

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра Автоматики та управління в технічних системах

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Ролік О. І.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології

на тему: «Інформаційна система управління виробництвом мінеральних

добрих у грануляторі з псевдозрідженим шаром»

Виконав: студент 6-го курсу, групи ІА-82мп
(шифр групи)

_____ Фесенко Сергій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник проф. АУТС, д.т.н., доцент Корнієнко Б.Я

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент Доцент ОТ, кандидат технічних наук, доцент Павлов В.Г.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України

**«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет _____ інформатики та обчислювальної техніки
(повна назва)

Кафедра _____ автоматики та управління в технічних системах
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
програмою

Спеціальність _____ 126 Інформаційні технології та системи
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Ролік О. І.**
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Фесенку Сергію Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Інформаційна система управління виробництвом
мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром»

науковий керівник дисертації проф. АУТС, д.т.н., доцент Корнієнко Б.Я
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 2019 р. №__

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: технологія виробництва гранульованих мінеральних
добрив у апараті з псевдозрідженим шаром

4. Предмет дослідження: інформаційна система управління виробництвом мінеральних добрив у псевдорозрідженому шарі
5. Перелік завдання, які потрібно розробити: огляд існуючих рішень, розробка системи управління, графічний матеріал
6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу: Функціональна схема управління гранулятора, графіки зміни температури теплоносія та гранул, Графіки перехідної характеристики, блок-схема програми, графіки керування LQR та PID регуляторами, схеми LQR та PID регуляторів.
7. Орієнтовний перелік публікацій: «Conduct of modern science 2019» «Fundamental and applied science 2019»,
8. Консультанти розділів дисертації
9. Дата видачі завдання – 02.09.2019

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проекту | Строк виконання етапів проекту | Примітка |
|-------|--|--------------------------------|----------|
| 1. | Огляд існуючих рішень | 2.09.2019 р. | |
| 2. | Створення математичної моделі системи | 14.09.2019 р. | |
| 3. | Створення та тестування програмного продукту для моделювання | 28.09.2019 р. | |
| 4. | Визначення та підготовка до вибору регулятора для системи управління | 1.10.2019 р. | |
| 5. | Вибір засобів розроблення | 15.10.2019 р. | |
| 6. | Розроблення системи управління | 31.10.2019 р. | |
| 7. | Аналіз системи в порівнянні з іншими системами управління | 5.11.2019 р. | |
| 8. | Розробка стартап – проекту | 15.11.2019 р. | |
| 9. | Оформлення текстової документації | 28.11.2019 р. | |
| 10. | Представлення до захисту | 03.12.2019 р. | |

Студент

Науковий керівник дисертації

Фесенко С.А.

(підпис) (ініціали, прізвище)

Корнієнко Б.Я.

(підпис) (ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Інформаційна система управління виробництвом мінеральних добрив у грануляторі з псевдозрідженим шаром» містить 114 сторінок, 37 рисунки, 28 бібліографічних посилань, 26 таблиць та 8 графічних додатків.

Ефективність грануляції залежить від механізму гранулоутворення, який визначається методом реалізації процесу. При правильно створеній моделі та подальшому синтезу системи управління можна заощадити до 15% споживання електроенергії гранулятором. Тому створення інформаційної системи оптимального управління яка б зменшувала енерговитрати є актуальною задачею.

Метою роботи є підвищення ефективності інформаційної системи управління виробництва мінеральних добрив, за рахунок розробки математичної моделі процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, та розробки LQR регулятора.

Об'єктом є технологія виробництва гранульованих мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром. Предметом є інформаційна система управління виробництвом мінеральних добрив у псевдорозрідженому шарі.

Результати дослідження та створення моделі опубліковані на XV міжнародній науково-практичній конференції «CONDUCT OF MODERN SCIENCE - 2019», м. Шеффілд, 30 листопада – 7 грудня 2019 року.

Ключові слова: гранулятор, псевдозріджений шар, математична модель, регулятор, перехідна характеристика.

ABSTRACT

The master's dissertation "Information system for production management of mineral fluidized bed granulated fertilizers" contains 114 pages, 37 drawings, 28 bibliographic references, 26 tables and 8 graphic appendixes.

The granulation efficiency depends on the granulation mechanism, which is determined by the process implementation method. With a properly designed model and subsequent synthesis of the control system, up to 15% of the power consumption of the granulator can be saved. Therefore, the creation of an information system of optimal control that would reduce energy consumption is an actual task.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the information system of management of production of mineral fertilizers by developing a mathematical model of the process of dehydration and granulation in the fluidized bed, and the development of LQR controller.

The object is the technology of production of granular mineral fertilizers in the fluidized bed apparatus. The subject is an information system for managing the production of mineral fertilizers in a fluidized bed.

The results of the study and the creation of the model were published at the 15th international scientific conference "CONDUCT OF MODERN SCIENCE - 2019", Sheffield, November 30 - December 7, 2019.

Keywords: granulator, fluidized bed, mathematical model, regulator, transition characteristic.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| СПИСОК СКОРОЧЕНЬ | 8 |
| ВСТУП..... | 9 |
| 1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ..... | 11 |
| 1.1 Переваги гранул перед іншими формами використання добрив..... | 11 |
| 1.2 Процес теплообміну в грануляторі з псевдозрідженим шаром | 14 |
| 1.3 Огляд процесу грануляції | 15 |
| 1.4 Параметри, що впливають на процес у псевдозрідженому шарі..... | 26 |
| Висновки до розділу..... | 29 |
| 2 АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ | 31 |
| 2.1 Основні підходи для побудови математичних моделей..... | 32 |
| 2.2 Модель балансу популяції..... | 34 |
| 2.2.1 Числові рішення моделі балансу популяції..... | 35 |
| 2.2.2 Дискретний метод | 36 |
| 2.2.3 Метод Монте Карло | 37 |
| 2.3 Модель обчислювальної динаміки рідин..... | 38 |
| 2.4 Багатокомпонентна МБП..... | 40 |
| 2.5 Трьохфазна МБП | 41 |
| Висновки до розділу..... | 41 |
| 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ В АПАРАТІ 3 ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ..... | 43 |
| 3.1 Аналіз моделювання гранулятора з псевдозрідженим шаром | 43 |
| 3.2 Дослідження гранулятора добрив з псевдозрідженим шаром..... | 44 |
| 3.3 Створення програмного продукту для моделювання..... | 50 |
| Висновки розділу..... | 55 |
| 4 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ГРАНУЛЯЦІЇ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ..... | 56 |
| 4.1 Поняття та принцип роботи регулятора..... | 56 |
| 4.2 Отримання перехідної характеристики та передавальної функції..... | 62 |
| 4.3 Перевірка системи на керованість та спостережуваність | 64 |
| 4.4 Синтез лінійно квадратичного регулятора (LQR) | 65 |

| | |
|--|-----|
| 4.4 Порівняння LQR регулятора з PID регулятором | 72 |
| 5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ | 76 |
| 5.1 Початок розробки, ідея, властивості, переваги | 76 |
| 5.2 Аналіз зовнішнього маркетингового середовища | 82 |
| 5.2.1 Аналіз факторів макромаркетингового середовища | 82 |
| 5.2.2 Фактори мікромаркетингового середовища які будуть впливати на бізнес | 86 |
| 5.3 Формулювання управлінської проблеми | 89 |
| 5.4 Конкурентний аналіз | 90 |
| 5.5 Стратегії ринкові стартап-проекту | 95 |
| 5.6 Продуктові (маркетингові) стратегії стартап-проекту | 97 |
| ВИСНОВКИ | 102 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 104 |

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

КТГП - кінетична теорія гранульованого потоку

МБП – модель балансу популяції

ОДР – обчислювальна динаміка рідин

Метод МК – метод Монте Карло

РБП – рівняння балансу популяції

КТГП – кінетична теорія гранульованого потоку

ВСТУП

Прибутковість сільськогосподарського підприємства залежить від врожайності культур. Адже задля високої врожайності потрібна не тільки технологія вирощування і своєчасність обробки, але і сприятливі властивості ґрунту. Найбільша частина родючих чорноземів в Україні сконцентрована на півдні, але навіть цей тип ґрунтів виснажується від безперервного щорічного використання, внаслідок чого знижується врожайність. Щоб зберегти високу врожайність та прибутки, потрібно поповнювати запас основних хімічних речовин ґрунту.

На сьогоднішній день хімічна промисловість в Україні у складному становищі. Пов'язано це з тим, що основою є виробництво добрив. Тому відновлення внутрішнього попиту на добрива до рівня забезпечення потреб сільського господарства і нарощування їх виробництва та експорту одні зі стратегічних цілей розвитку економіки.

У процесі виробництва часто необхідно перевести рідку вихідну сировину в тверду речовину з точно заданими властивостями, яка потім буде піддана подальшій переробці. Такі перетворення нерідко потрібні для того, щоб зробити продукт більш компактним і зручним для транспортування і зберігання, а також для підвищення його хімічної стабільності. Для отримання твердих частинок з рідкого вихідного матеріалу існують різні процеси: наприклад кристалізація, грануляція та сушка розпиленням.

Розмір також має великий вплив на питання безпеки та навколишнього середовища: Якщо товарний матеріал утворюється з токсичного матеріалу, а пил утворюється та звільняється, то існує небезпека вдихання токсичної речовини, що може призвести до довгострокового погіршення здоров'я.

Дана технологія надає продукту такі важливі властивості як високу сипкість, стійкість до стирання і крихкості, хорошу розчинність і оптимальність за дозуванням.

Грануляти не утворюють пилу, мають щільну структуру поверхні і високу насипну щільність, а завдяки малій площі поверхні вони також мають низьку гігроскопічність. Гранулювання розпиленням - оптимальне рішення для

перетворення рідкої вихідної сировини в жорсткі форми продукції. Основною перевагою цього методу є те, що в порівнянні з іншими методами можна виконати кілька етапів в одному і тому ж елементі обладнання.

Ефективність грануляції залежить від механізму гранулоутворення, який визначається методом реалізації процесу. При правильно створеній моделі та подальшому синтезу системи управління можна заощадити до 15% споживання електроенергії гранулятором. Тому створення інформаційної системи оптимального управління яка б зменшувала енерговитрати є актуальною задачею.

1 ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Переваги гранул перед іншими формами використання добрив

Найбільша частина всіх промислово перероблених товарів зберігається та використовується у вигляді твердих речовин. Якщо переосмислити термін "частинка" від всім звичного значення до, наприклад, суспензій, розчинів (твердих матеріалів у рідинах), аерозолів (крапель рідини в газі) або газових бульбашок у рідині, то приведені товари потрапляють під цю категорію. У щоденному житті є велика кількість прикладів твердих продуктів: перемелена та смажена кава, розчинний порошок какао та цукор, молочний порошок. Більше того, тверді частинки відіграють важливу роль у таких напрямках як: охорона здоров'я (наприклад, у формі діючого фармацевтичного засобу, пресованого в пігулку), в сільському господарстві у вигляді добрив або в хімічній індустрії як порошки каталізатора[1].

Тверді вироби у вигляді порошоків, виготовлених з рідкої сировини, мають ряд переваг; Наприклад, їх часто легше транспортувати, переробляти та зберігати, ніж у рідкому вигляді. Одним із прикладів може бути молоко: у рідкому вигляді йому потрібне зберігання у прохолоді, щоб воно не зіпсувалося. Однак, якщо його висушити розбризкуванням, тобто видалити всю вологу з емульсії сушкою, то отримана консистенція може зберігатися при кімнатній температурі протягом тривалого часу. При цьому, рідкий стан можна легко відновити в будь-який час, розвівши порошок у певній кількості води. Властивості продукту часто можна охарактеризувати властивостями частинок, а якщо точніше то, властивості частинок впливають на властивості продукту. Найважливішими властивостями частинок є, наприклад,

- форма частинок і розмір,
- їх пористість,
- ентальпія (температура) та вміст вологи.

Форма та розміри частинок визначають, наприклад, пропускну здатність порошку. Якщо частинки порошку занадто малі, то згуртовані сили між частинками

перешкоджають вільному потоку[2]. Таке можна побачити, порівнюючи кристалічний цукор і цукровий порошок: Ці два продукти складаються з одного і того ж матеріалу, але цукровий порошок повільніше протікає через менший розмір частинок.

Розмір впливає на питання безпеки та навколишнього середовища в великій мірі: Якщо товарний матеріал утворюється з токсичного матеріалу, а пил утворюється та звільняється, то існує небезпека вдихання токсичної речовини, що може призвести до довгострокового погіршення здоров'я. З боку навколишнього середовища 1 гербіцидне протруєння може призвести до загибелі основних комах, якщо вони споживають дуже дрібні частинки. Крім того, дрібні порошки є небезпекою для вибуху, якщо вони будуть дисперговані в газоподібному вогненебезпечному середовищі. Крім цих аспектів, розміри частинок можуть впливати на ефективність продукту, наприклад у фармацевтиці: Тут метою може бути виробництво таблетки із заздалегідь визначеним, , характерним для діючої речовини, розчиненням. На цю характеристику впливає товщина шару покриття, яка наноситься на активний інгредієнт, щоб захистити його від перетравлювальних кислот, за допомогою яких відбувається перетравлення у шлунку.

Ефективність діючої речовини сильно залежить від якості шару: якщо він занадто тонкий, інгредієнт стає активним ще до досягнення бажаного призначення - якщо інгредієнт занадто густий, він може не розчинитися взагалі. Пористість також впливає на властивості частинок: якщо частинка надто пориста, то вона може мати знижену стійкість до зберігання, тобто частинка може розсипатися при дії на неї сил, наприклад, ваги інших частинок. Це призводить до появи шару пилюватих частинок на дні контейнера для зберігання. Це також може вплинути на ефективність продукту: якщо частинка занадто пориста, то активний інгредієнт може вивільнитися занадто швидко, що призводить до передозування, якщо вона занадто спресована, вивільнення може бути занадто повільним, а інгредієнт може мати лише дуже обмежений ефект.

Температура та вміст вологи впливають на складність транспортування та зберігання продукту. Якщо товар надміру вологий, він може утворювати дуже

великі товщі, які більше не можна використовувати. Для запобігання подібних подій часто необхідна постійна підтримка умов для зберігання товару, тобто сушка та охолодження. Це два енергетично затратні процеси, що мають чималий вплив на собівартість продукції, іншими словами, властивості частинок можуть мати вплив на економічність продукту[3]. Крім того, на пористість при створенні частинки впливають вологість і температура під час процесу. Це видно на рис. 1.1, де утворюються частинки з різною кінцевою пористістю.

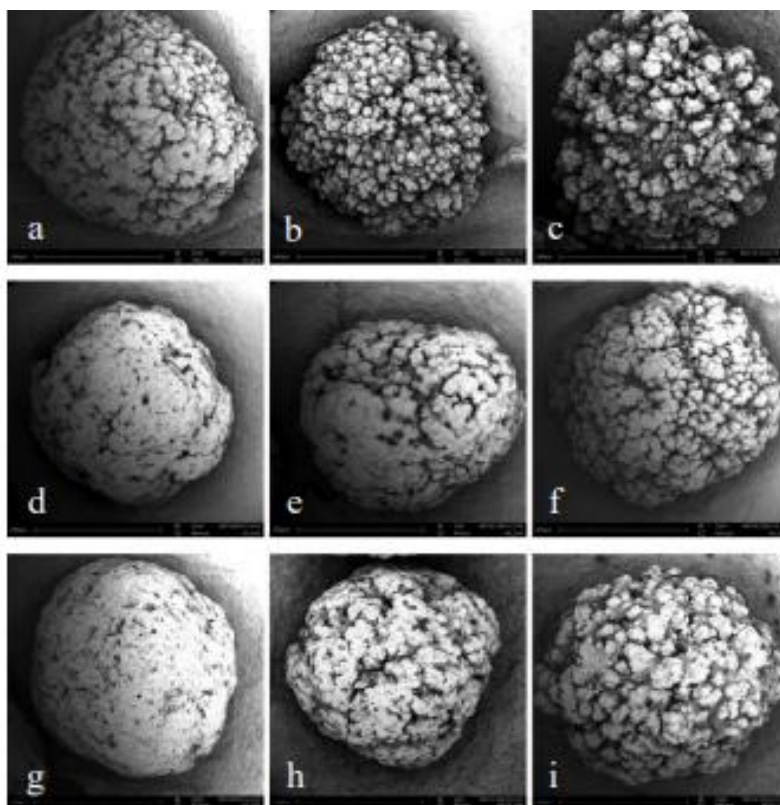


Рисунок 1.1 – Вплив вологості та температури на отриману структуру.
Зверху вниз: збільшення в температурі. Зліва направо: підвищення вологості;

1.2 Процес теплообміну в грануляторі з псевдозрідженим шаром

Переваги гранулятора (рис 1.2) з псевдозрідженим шаром:

- Поверхня фазового контакту є достатньо розвинутою;
- Висока інтенсивність процесів теплообміну;
- Питома продуктивність на високому рівні;
- Мінімальні витрати на розробку та виготовлення апарату;
- Гранульований продукт однорідний та має високу якість;
- Наявність можливості повної автоматизації і механізації безперервного ведення процесу;
- Процеси висушування та гранулювання є суміщеними, що спрощує схему виробництва.



Рисунок 1.2 – Вигляд гранулятора з псевдозрідженим шаром

Так як, процеси теплообміну проходять водночас з процесами масообміну, але закони переходу теплоти та маси залишаються незмінними, то їх вивчення

об'єднали в дисципліну тепломасообміну. Тепломасообмін – це дисципліна науки про самовільні незворотні процеси поширення теплоти в змінному полі температур та також мимовільні необоротні процеси поширення маси в змінному полі концентрацій[4]. У рухомих середовищах вище вказані процеси залежать від швидкості руху середовища у якому вони протікають.

Відповідно до другого закону термодинаміки мимовільних процесів про поширення теплоти, її поширення напрямлене в сторону зменшення температури. Так само і потік маси у змінному полі концентрацій напрямлений у сторону даного компонента суміші.

Методи термодинамічного аналізу відрізняються від методів тепломасообміну тим, що тут розглядається розвиток процесів перенесення у просторі та часі.

Після рішення задачі тепломасообміну на виході отримують розподіл температур, потоків теплоти і маси з функціями координат та часу, і концентрацію компонентів суміші[4].

Характер тепломасообміну в псевдозрідженому шарі визначає характер формування гранул та швидкість їхнього утворення, за умовами взаємодії між частинками та краплями дисперсного розчину.

Висушування та кристалізація речовини яка гранулюється проходить в умовах зіткнення крапель з теплоносієм або окремими гранулами. Характер грануляції та її перебіг залежить також від змоги гранул акумулювати тепло, тобто теплозбереження.

1.3 Огляд процесу грануляції

Як правило, частинки не є однорідними, тобто мають розподіл за своїми властивостями, наприклад, за розміром, формою, вмістом вологи або складом. Цей розподіл також характеризує якість продукту. Збільшення вимог замовника породжує необхідність реалізувати заздалегідь заданий або необхідний розподіл частинок у процесі. Є кілька методів отримувати гранули за допомогою вологого гранулювання (рис 1.3), але в даній роботі буде розглядатися тільки один.

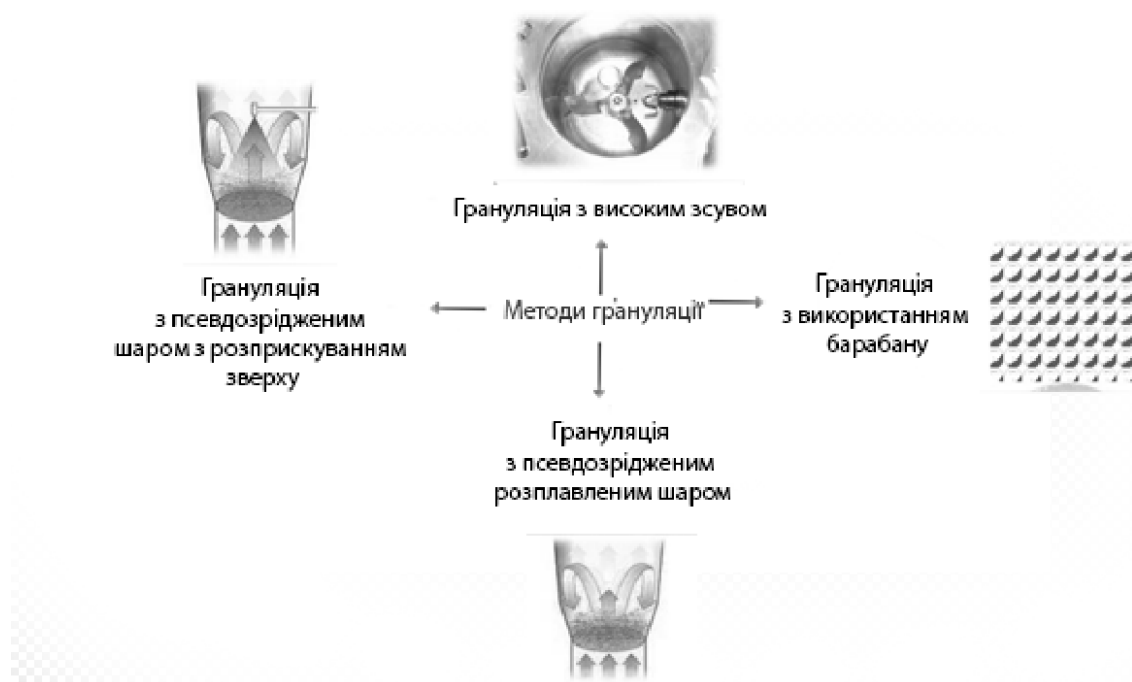


Рисунок 1.3 – Методи вологого гранулювання

Грануляція розпиленням в псевдозрідженому шарі дозволяє отримувати сипучі грануляти із заданими властивостями безпосередньо з рідин. Рідини з вмістом твердої фази, наприклад розчини, суспензії або розплави, розпорошуються в установці псевдозрідженого шару. Внаслідок активного теплообміну вода і органічні розчинники миттєво випаровуються, а що утворилися при цьому тверді частинки стають центрами гранулоутворення. Вони змочуються новими порціями рідини, яка також випаровується, та утворює нові шари оболонки навколо вихідного центру.

Під час цього безперервного процесу в псевдозрідженому шарі гранули ростуть пошарово, утворюючи структуру, яка подібна цибулині. Альтернативно, в гранулятор можна подати необхідну кількість частинок, які будуть виконувати роль зародків для гранул[5]. При цьому рідина служить лише засобом транспортування речовини для будівництва гранул (рис 1.4 та рис 1.5).



Рисунок 1.4 – Початкові центри грануляції ($d_e = 1.85$ мм)

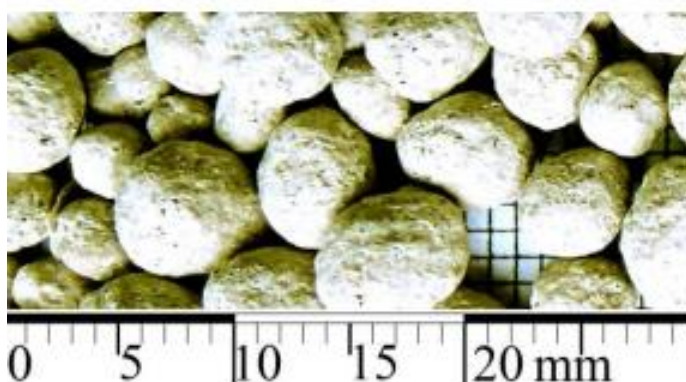


Рисунок 1.5 – Загальний вигляд гранульованого продукту ($d_e = 3.58$ мм)

Процес Нуклеації означає утворення початкових ядер шляхом злиття первинних частинок разом після приведення рідкого сполучного в контакт із сухим порошком.

Як важлива стадія грануляції, зародження відіграє вирішальну роль, оскільки отриманий початковий розподіл розмірів ядер впливатиме на отриманий розподіл розміру гранул і є необхідність вивчення механізму зародження.

Нуклеація відбувається, коли краплина сполучної речовини проникає в порошкову масу і притягує частинки в її безпосередній близькості, утворюючи гранулярне ядро. На цей процес головним чином впливає здатність рідкої сполучної речовини поширюватися по твердій поверхні.

Шляхом багатьох експериментальних досліджень було запропоновано два чіткі механізми зародження (рис. 1.6) механізм занурення та механізм розподілу залежно від співвідношення розміру частинок до розміру крапель [6].

Занурення



Розподіл



Рисунок 1.6 – Механізми нуклеації

У механізмі розподілу сполучна речовина розподіляється на поверхні частинок порошку, і утворення ядер відбувається шляхом злиття між змоченими частинками [7]. У механізмі занурення, де розмір крапельки сполучної речовини більший за розмір частинок порошку, первинні частинки фіксуються на поверхні і згодом занурюються.

Тому фактори, які можуть сприяти невеликому розміру крапель сполучної речовини, такі як низька в'язкість сполучного та висока швидкість робочого колеса, сприятимуть механізму розподілу нуклеації.

З іншого боку, великий вихідний розмір крапель сполучної речовини, висока в'язкість сполучного речовини та низька швидкість робочого колеса сприяють механізму занурення.

Шарувата структура гранул надає їм високу щільність і стійкість до стирання. Змінюючи такі параметри, як розмір гранул, залишкову вологість і вміст твердої фази, можна отримувати продукти з різними властивостями. Цей метод дозволяє

отримати гранули середнім розміром від 50 мкм до 5 мм. Через те, що при зовнішньому нагріванні потоку газу для псевдозрідження, рідина в суспензії випаровується, тверда речовина залишається на частинці, (Рис. 1.7), де показано частинку, взятую з грануляційного розпилення.

Через інтенсивне перемішування частинок у шарі осад твердої речовини на краплі можна вважати рівномірним. Дивлячись та беручи це до уваги, спостерігається шаруватий ріст частинок і збільшення їх розмірів. Цей механізм зображений на рис. 1.8.



- 1) центр грануляції;
- 2) композитні мікрошари.

Рисунок 1.7 – Еволюція частинки під час гранулювання розпиленням

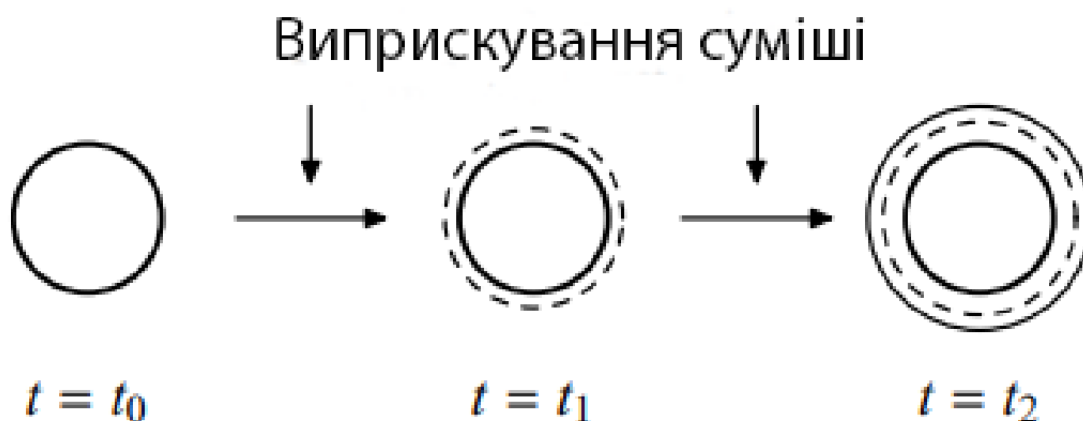
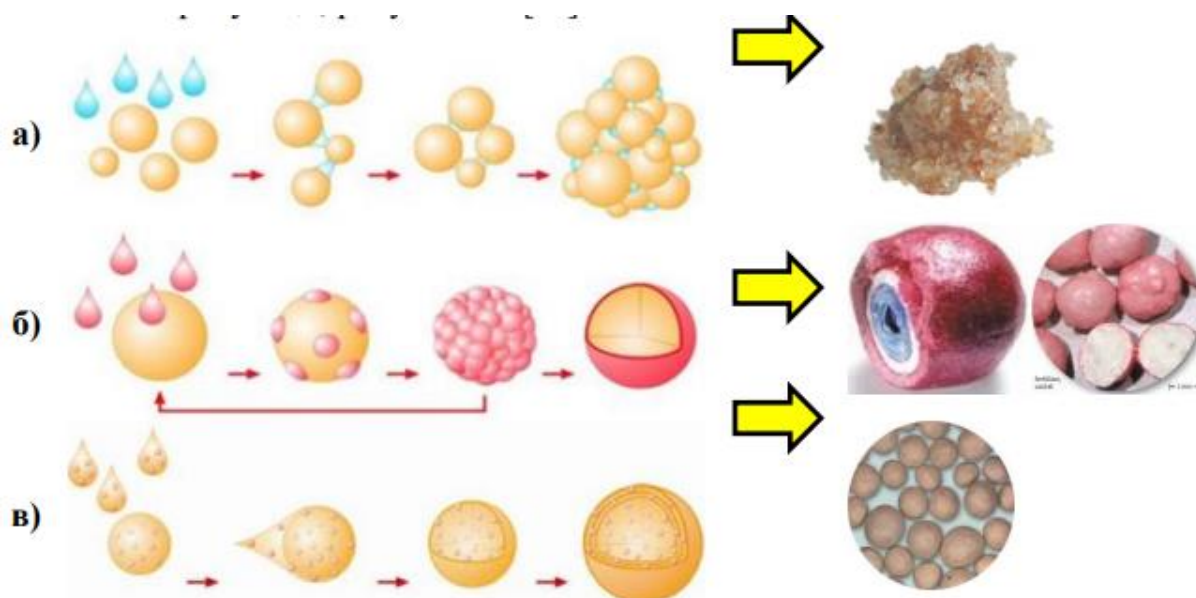


Рисунок 1.8 – Схематичне зображення шаруватого росту частинок пульверизаційною грануляцією.

Якщо тверда речовина, що міститься в розпилювачі, ідентична матеріалу частинок у шарі, процес називається грануляцією розпилення. Цей вид розпилення використовується, наприклад, при виробництві добрив або у харчовій промисловості.

Якщо матеріали відрізняються, процес називається покриттям. Він має широке застосування у фармацевтичних препаратах, наприклад, у покритті активного фармацевтичного інгредієнта захисним шаром або у виробництві таблеток з декількома шарами різних активних інгредієнтів.

При цьому, найбільш часто реалізуються агломераційний та пошаровий механізми грануляції (рис 1.9).



а) агломерація;

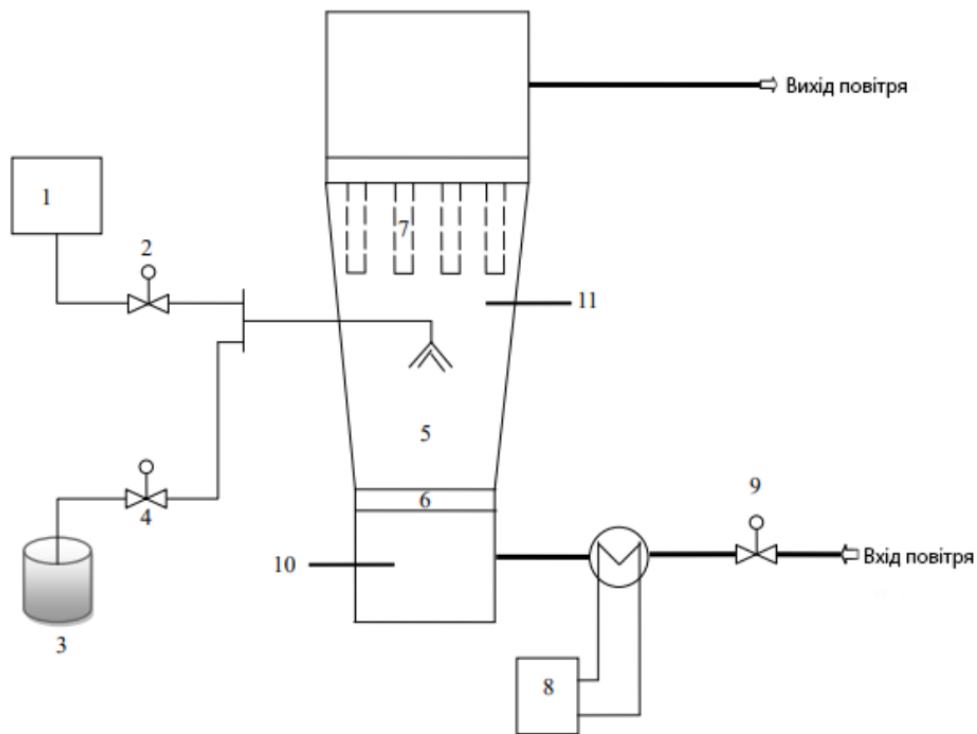
б) капсулювання;

в) нашарування гомогенних та гетерогенних систем

Рисунок 1.9 – Найбільш поширені механізми грануляції

Окрім розшарування частинок, відбувається перенесення тепла та маси через фазові межі. Для спрощення подальшого моделювання рідина розглядається не як самостійно окрема фаза, а як складова або твердої фази (у вигляді рідини), або газової фази (у вигляді пари). В основному частинки в неоднакові; вони можуть відрізнятися за своїми властивостями, наприклад розмір, вологість, ентальпія, пористість або форма тощо. Треба взяти до уваги, що положення кожної частинки у просторі технологічної камери буде різним. Моделювання зміни такого розподілу властивостей, а отже, і моделювання процесу, можна здійснити при використанні моделі балансу популяції.

Зазвичай гранулятор рис. 1.10 з псевдозрідженим шаром розглядається як апарат, що складається з технологічної камери з розподільною пластиною на дні, яка пропускає потік рідини або газу.



- 1) Повітряний компресор
- 2) Атомізуючий регулятор тиску
- 3) Контейнер з розчином сполучного
- 4) Регулятор швидкості потоку сполучного
- 5) Контейнер для продукту
- 6) Повітряний розподільник (отвір)
- 7) Фільтр заднього видуву
- 8) Контролер нагрівача
- 9) Регулятор швидкості вхідного повітря
- 10) Проба температури вхідного повітря
- 11) Проба температури повітря на виході

Рисунок 1.10 – Функціональна схема гранулятора

Зверху на пластині розподільника розміщується нерухомий шар, або так звані частинки в спокої із середньою пористістю ψ , (рис. 1.10 (а)). Потім потік рідини подається до апарату через розподільну таріль. Якщо буде досягнута певна швидкість масового потоку, яка відповідає швидкості рідини тоді спостерігається

ослаблення шару, і частинки зависають і рухаються в шарі у випадкових напрямках - цей стан називається киплячим шаром (рис. 1.11 (б)).

Також можна спостерігати розширення висоти ліжка порівняно з початковим нерухомим шаром та зміну пористості. У подальшому збільшення потоку рідини дає розширення шару та інтенсивне змішування частинок у шарі, (рис. 1.11 (в)). Макроскопічно частинки ведуть себе як рідина в цьому стані[8].

Якщо потік речовини додатково збільшується, в деякий момент частинки транспортуються з потоком речовини. Цей стан називається пневматичним транспортуванням або елютріацією частинок; відповідна швидкість речовини називається швидкістю елютріації (рис. 1.11 (г)).

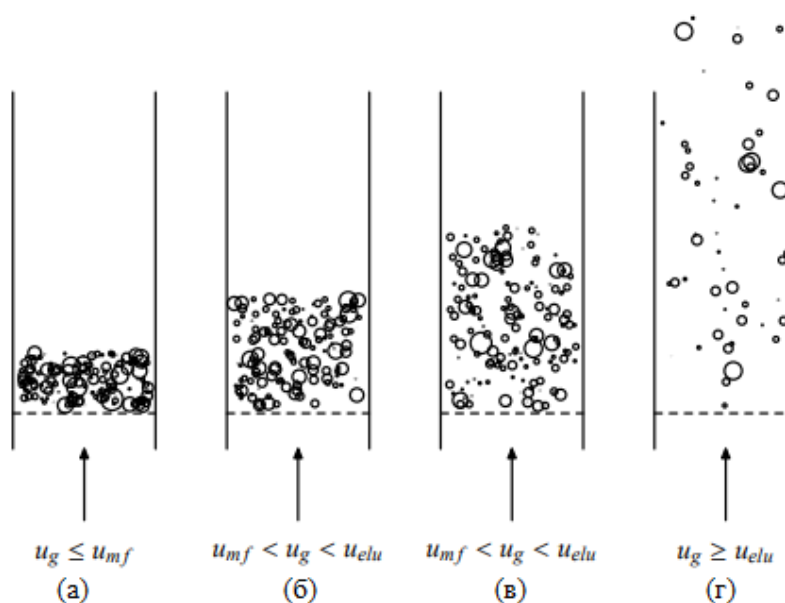


Рисунок 1.11 – Різні стадії киплячого шару: (а) нерухомий шар; (б) - (в) псевдозрідження; (г) пневматичне транспортування (елютріація)

У грануляції з псевдозрідженим шаром твердий матеріал, наприклад у вигляді суспензії або розчину, розпорошується на частинки, які перемішуються потоком газу. Для цього в технологічну камеру встановлюється форсунка. Найбільш поширені конфігурації:

- Якщо розпилювач встановлений над шаром частинок (в спокої) – це називається конфігурацією верхнього розпилення.

- Якщо розпилювач розташований в нижній частині технологічної камери, тобто частинки розпорошуються знизу, це називається нижньою конфігурацією розпилення.

В тому та іншому випадках краплі суспензії залишають розпилювач і осідають на частинки. Завдяки зовнішньому нагрітому потоку газу рідина в суспензії випаровується, тверда речовина осідає на частинці. Через інтенсивне перемішування частинок у шарі осад твердої речовини на краплі можна вважати рівномірним. Поступово спостерігається шаруватий ріст частинок і збільшення розмірів (рис. 1.12).

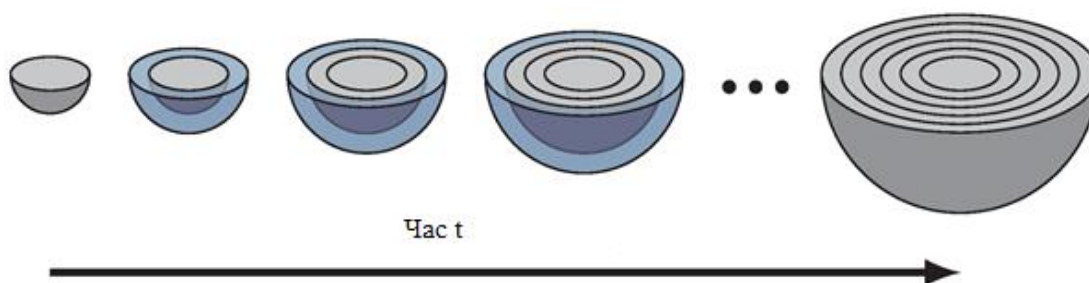


Рисунок 1.12 - Еволюція частинки під час гранулювання розпиленням

Гельдарт визначив за двома параметрами, масовою щільністю та діаметром частинок у шарі чотири групи (рис. 1.13) з різною поведінкою гранулювання:

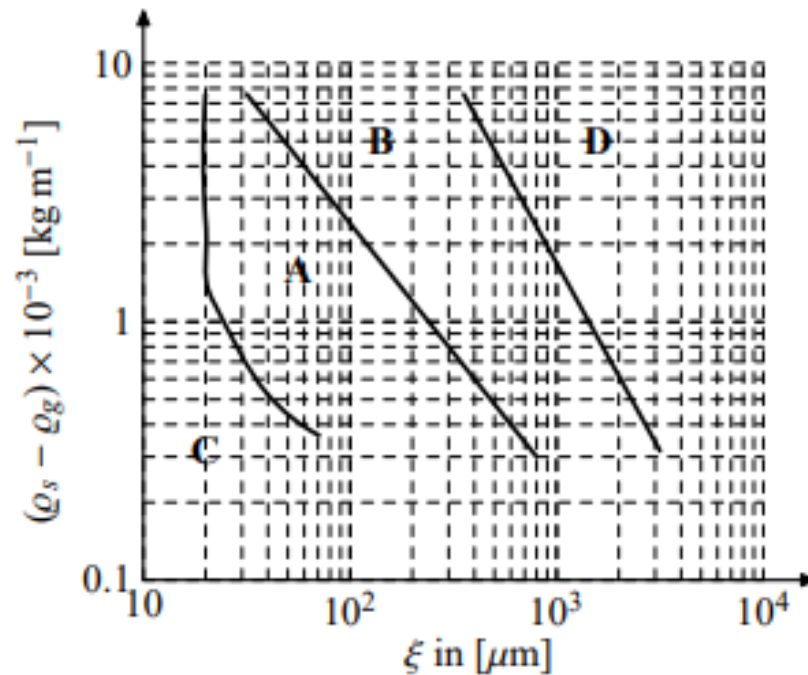


Рисунок 1.13– Класифікація частинок на чотири групи залежно від поведінки їх псевдозрідження

- Група C: Частинки розміром менше 50 мкм потрапляють у цю групу. Їх дуже важко створити через сильні скріплювальні сили між частинками.

- Група A: Частинки в діапазоні 50 - 200 мкм і масовою щільністю в діапазоні 700 - 1400 кгм⁻³. Їх не так важко створювати, але відчувається сильне розширення шару (навіть при мінімальній швидкості гранулювання). Крім того, в шарі накопичуються важко контрольовані газові бульбашки.

- Група B: Це частинки з діапазоном 40 - 500 мкм і щільністю між 1400 - 4000 кгм⁻³ є одним із кращих застосувань з киплячим шаром. Хоча і тут накопичуються газові бульбашки, кількість залежить лише від швидкості рідини і її можна легко контролювати.

- Група D: Частинки з дуже великими розмірами або з дуже високою щільністю маси потрапляють до цього класу. Вони важко псевдозріджуються за описаними вище налаштуваннями (володіють утворенням бульбашок), але можуть досить швидко утворюватись.

Інші ефекти, які можуть виникнути під час грануляції, є

- Попереднє висушування крапель: Коли крапля покидає розпилювач, вона майже миттєво потрапляє в контакт з нагрітим газом і рідина починає випаровуватися. Коли відстань до шару дуже велика, або температура надто висока, або висихання дуже швидко відбувається, тобто потік газу дуже гарячий і сухий, рідина випарується, перш ніж крапелька може осідати на частинці в шарі. Після цього крапля самостійно утворює дуже маленьку тверду частинку (ядро). Цей ефект називається нуклеацією.

- Якщо в шарі стикаються декілька частинок з не повністю висушеними поверхнями, а в'язкість суспензії на поверхні досить висока, то утворюється міцне сполучення між частинками. У найпростішому випадку ця група частинок через деякий час утворює нову, більшу частинку. Цей ефект називається агломерацією. Критерій виникнення процесів з псевдозрідженим шаром надано [7].

- Ефект, протилежний агломерації, виникає, якщо агломерат стикається з іншою частинкою або стінками технологічної камери. Якщо кінетична енергія контакту є надто великою та не може бути поглинена твердими сполученнями, частинка розривається. Тому ефект називається поломкою. Критерії, коли сполучення (або навіть частинка) розпадаються, все ще досліджуються в технологічній галузі[9].

1.4 Параметри, що впливають на процес у псевдозрідженому шарі

Відомо, що відносна вологість повітря на вході впливає на швидкість зростання частинок кінцевого продукту, і була розглянута рядом дослідників. Було виявлено, що більш великі гранули утворюються при збільшенні відносної вологості повітря на вході. Оскільки здатність води випаровуватися зменшується, а утворення рідких і твердих мостів збільшується.

Швидкість повітря на вході в псевдозріджений шар є важливим робочим параметром, що впливає як на гідродинаміку псевдозрідження, так і на зростання гранул, і він грає ключову роль в забезпеченні однорідності змішування порошку.

Температура повітря на вході є ключовим параметром, що впливає на температуру киплячого шару і випаровування вологи. Більш висока температура повітря на вході може швидко висушити вологі гранули і скоротити час грануляції.

Існує кілька фізико-хімічних властивостей, які впливають на процес гранулювання. Найбільш досліджувані включають розмір частинок первинного порошку, кількість рідини на твердій речовині, розчинність та властивості зв'язувальної речовини: концентрація зв'язувальної речовини, в'язкість

Властивості первинного матеріалу мають важливий вплив на процес гранулювання та кінцеві властивості гранул. Зазвичай, властивості порошку включають розмір частинок первинного порошку, вологість зв'язувальної рідини на тверді речовини, розчинності та коефіцієнт форми частинок. Було показано, що зі зменшенням середнього розміру первинних частинок швидкість росту частинок збільшувалася, а середній розмір кінцевої гранули зменшувався. Швидкий темп зростання спостерігається при збільшенні розчинності первинного порошку. Вологість поверхні частинок може бути вказана за кутом контакту між краплею зв'язувальної та твердою частинкою, а результати експериментів показують, що кінетика агломерації стає більш важливою у міру зменшення кута контакту.

Під час процесу грануляції рідка зв'язувальна речовина розпорошується у шарі, а частинки скріплюються рідкими мостами. Тому властивості сполучної речовини мають ключовий вплив на грануляцію.

Було встановлено, що імпульсне розпилення має більший потенціал для контролю процесу грануляції для визначення якості кінцевого продукту та орієнтації на розмір кінцевих частинок у грануляції з псевдозрідженим шаром [10-11].

Під час грануляції з псевдозрідженим шаром рідка в'язуча речовина розпорошується розпилювачем у шар в двох режимах: безперервному розпиленні та імпульсному розпиленні.

Безперервне розпилення полягає в розпиленні сполучного розчину в киплячий шар безперервно з початку експерименту, який використовується для більшості експериментальних досліджень грануляції з псевдозрідженим шаром.

Імпульсне розпилення полягає в тому, щоб перервати подачу сполучної речовини в регулярній послідовності, завдяки чому порошкові матеріали в киплячому шарі піддаються періодичному висиханню та змоченню, що призводить до кращого контролю вологості повітря в камері грануляції[12].

Було встановлено, що короткочасний період обприскування впливав на рівень вологості шару, але не впливав на швидкість росту та кінцевий розмір гранул, коли кількість рідини для грануляції була постійною. Було встановлено, що час паузи рідкого живлення можна використовувати для компенсації зміни швидкості подачі рідини та вологості повітря на вході для підтримки середнього розміру гранул.

Було також зазначено, що пульсація зменшила середній розмір гранул та трохи розширила розподіл розмірів, коли швидкість подачі рідини та відносна вологість були постійними, що може пояснюватися стиранням гранул під час імпульсного розпилення.

Цикл розпилення включає два етапи: фазу розпилення, при якій насос включений для розпилення сполучного розчину на шар заздалегідь визначений час та імпульсну фазу, при якій насос вимикається, щоб припинити розпилення сполучного розчину на визначений час .

Попередній цикл розпилення закінчується, а наступний починається знову. Повторні цикли розпилення змушують пульсувати розпилювач. У розпилювальному колі співвідношення простою та часу обприскування називається імпульсною частотою, яка, як правило, керується комп'ютером в експериментах.

Наприклад, частота імпульсів дорівнює нулю, показуючи, що зв'язуючий розчин розпорошується безперервно, а частота імпульсу дорівнює 1, що вказує на те, що сполучний розчин розпорошується на половину кругового розпилення і зупиняється на інше півколо.

Було встановлено, що короткочасний період обприскування впливав на рівень вологості шару, але не впливав на швидкість росту та кінцевий розмір гранул, коли кількість рідини для грануляції була постійною. Було встановлено, що час паузи рідкого живлення можна використовувати для компенсації зміни швидкості подачі рідини та вологості повітря на вході для підтримки середнього розміру гранул.

Промисловий процес грануляції часто пов'язаний з великими коефіцієнтами рециркуляції та високою швидкістю відхилення. Це вкрай небажано через значну витрату товарних запасів. Тому доцільно використовувати модельний системний підхід для кращого контролю, прогнозування та оптимізації процесу грануляції (Linniger et al., 2000). Це може суттєво допомогти в покращенні розуміння процесів, доповнити наявні знання новими даними, скоротити час і витрати на розробку технологічних продуктів. Протягом останніх років з'явилися численні підходи до моделювання, які спрямовані на полегшення функціонування процесу грануляції, надаючи прогнози.

Висновки до розділу

Грануляція розпиленням в псевдозрідженому шарі дозволяє отримувати сипучі грануляти із заданими властивостями безпосередньо з рідин. Шарувата структура гранул надає їм високу щільність і стійкість до стирання. Змінюючи такі параметри, як розмір гранул, залишкову вологість і вміст твердої фази, можна отримувати продукти з різними властивостями.

Найважливіші властивості зв'язувальної речовини включають в'язкість, концентрацію та вміст. Як правило, швидкість росту, максимальний середній діаметр гранул та кінцева пористість збільшуються у міру збільшення концентрації зв'язувальної речовини. Доведено, що зв'язувальна речовина з низькою в'язкістю сприяє грануляції та швидкості росту, що обумовлено високою ймовірністю в'язучих речовин стикатися поверхнями.

Відомо, що відносна вологість повітря на вході впливає на швидкість зростання частинок кінцевого продукту, швидкість повітря на вході в псевдозріджений шар є важливим робочим параметром, так як і властивості вихідного матеріалу. Більш висока температура повітря на вході може швидко висушити вологі гранули і скоротити час грануляції.

Окрім розшарування частинок, відбувається перенесення тепла та маси через фазові межі. Для спрощення подальшого моделювання рідина розглядається не як окрема фаза, а як частина або твердої фази (у вигляді рідини), або газової фази (у вигляді пари).

Нуклеація відбувається, коли краплина сполучної речовини проникає в порошкову масу і притягує частинки в її безпосередній близькості, утворюючи гранулярне ядро. На цей процес головним чином впливає здатність рідкої сполучної речовини поширюватися по твердій поверхні.

Шляхом багатьох експериментальних досліджень було запропоновано два чіткі механізми зародження: механізм занурення та механізм розподілу залежно від співвідношення розміру частинок до розміру крапель.

Протягом останніх років з'явилися численні підходи до моделювання, які спрямовані на полегшення функціонування процесу грануляції, які будуть розглянуті в наступному розділі.

2 АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

В більшості випадків дослідження проводяться з висхідним потоком теплоносія для псевдозрідженого шару та беручи до уваги турбулентність у псевдозрідженому шарі.

Щоб охарактеризувати модель у повному обсязі треба брати до уваги кількість фаз. Фаза – це область що містить тверду речовину або газ.

Фази можуть відрізнятися між собою за об'ємами часток твердої речовини що в них знаходиться, за зовнішнім виглядом або за характеристиками гідродинаміки. Найперші моделі для апаратів з використанням гранулювання у псевдозрідженому шарі, ґрунтувалися на однофазному моделюванні. Таким чином дослідники намагалися змодельовати процес грануляції тільки за осьовим перемішуванням газів. Ця спроба була невдалою тому що, дана модель описувала перемішування ще гірше, аніж модель з ідеальним перемішуванням. Не менш основним для продуктивності апарату є контакт твердих частинок у газі з урахуванням утворення бульбашок.

Для більш точного проектування також необхідно враховувати особливості гідродинаміки. Використавши моделі Девідсона та Харрісона пов'язані з відмінностями отримання однофазної моделі для апарата з ідеальним перемішуванням та двофазної моделі, можна отримати умовно перемішану суцільну фазу.

Швидкість процесу у дифузійній області, визначається коефіцієнтом масопереносу, виходячи з цього відмінності між цими двома моделями є несуттєвими. Але переваги двофазних моделей однозначно суттєві. Відсутність урахування бульбашок у газі при однофазній моделі призвела до винайдення двофазних[13].

2.1 Основні підходи для побудови математичних моделей

Модель Мая - розподіл потоку газу відбувається за двофазною теорією; також передбачено, що потік бульбашок (рис 2.1) знаходиться в загальному потоці; тверді тіла відсутні в бульбашках газу; газовий потік в емульсійній фазі збільшує швидкість разом із загальним потоком; поруватість в емульсійній фазі за мінімальними умовами псевдозрідження.



Рисунок 2.1– Потік бульбашок у шарі гранулятора

Модель Оркутта й Девідсона-Харрісона, запропонована Дж. Оркуттом і відтворена Дж. Девідсоном і Д. Харрісоном, була однією з найперших, де у параметрах закладено вплив динаміки газових бульбашок. Він ґрунтується на наступних припущеннях:

- за двофазною теорією розподіляється газовий потік;
- потік газових бульбашок перебуває в спільному потоку;
- тверді тіла відсутні в бульбашках газу;

- структура потоку газу в щільній фазі – або повністю змішана, або витісняється;

- поруватість у фазі емульсії згідно з мінімальними умовам псевдозрідження;
- проникнення й дифузія як складники міжфазного масообміну.

Після цього модель було модернізовано Р. Дартоном з урахуванням зростання бульбашок у шарі.

У Моделі Грейса діють такі припущення:

- чистий вертикальний потік газу в щільну фазу відсутній; потік бульбашок газу імовірно витісняється;

- у застійних зонах щільної фази не відбувається змішування;
- поруватість у щільній фазі згідно з мінімальними умовам псевдо зрідження.

Ця модель є спрощенням моделі висхідного трифазного шару і моделі протитечії зворотного перемішування. В цій моделі знехтувана фаза хмари. Було прийнято припущення про відсутність вертикального потоку газу в щільній фазі. У моделі Грейса також враховано перебування твердих тіл в межах фази бульбашок.

Дж. Вертером було запропоновано[14]:

- відсутність чистого вертикального потоку газу в щільну фазу; потік бульбашок газу імовірно витісняється;

- у застійних зонах щільної фази не відбувається змішування;
- поруватість в щільній фазі відповідає мінімальним умовам псевдозрідження;
- коефіцієнт масопередачі вважається незалежним від осьових і радіальних позицій.

У літературі існує багато моделей коалесценції, що описують механізми коалесценції, які включають різноманітні параметри рецептури та процесу, такі як механічні властивості гранул, властивості рідкого сполучення та швидкість зіткнення гранул. В основному ці моделі розглядають, чи відскочить частинка або злипнеться під час зіткнення.

У цих моделях злиття відбувається, якщо частинки не володіють достатньою кінетичною енергією для відскоку. Наприклад, Енніс та ін. вивчали недеформаторну коалесценцію, розглядаючи зіткнення двох твердих частинок, обидві яких були

оточені тонким в'язким сполучним шаром. У їхній моделі досліджено в'язку силу, злиття відбувається успішно лише за умови, що кінетична енергія частинок буде повністю розсіяна у сполучному шарі.

2.2 Модель балансу популяції

Для розробки кращого методу проектування і стратегії управління необхідна точна математична модель процесу грануляції в киплячому шарі. Модель балансу популяції (МБП) використовується для опису зміни гранулометричного складу гранульованого псевдозрідженого шару в великій кількості робіт протягом десятиліть.

Загальне рівняння балансу гранулятора в пакетному режимі, яке описує швидкість зміни функції чисельної щільності частинок $n(t, L)$ задано наступним чином:

$$\frac{\partial n(t, L)}{\partial t} = B(t, L) \quad \text{Утворення} \quad (2.1)$$

$$- \frac{\partial n}{\partial L} (G(t, L)n(t, L)) \quad \text{Зростання} \quad (2.2)$$

$$+ \frac{L^2}{2} \int_0^L \frac{\beta\left(t, (L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}, \lambda\right)}{(L^3 - \lambda^3)^{\frac{2}{3}}} n\left(t, (L^3 - \lambda^3)^{\frac{1}{3}}\right) n(t, \lambda) d\lambda - n(t, L) \int_0^\infty \beta(t, L, \lambda) n(t, \lambda) d\lambda$$

Агрегація (2.3)

$$+ \int_L^\infty S(t, \lambda) b(t, L|\lambda) n(t, \lambda) d\lambda - S(t, L) n(t, L) \quad \text{Руйнування} \quad (2.4)$$

Де $n(t, L)$ - функція щільності в залежності від діаметра частинки L . $\beta(t, L, \lambda)$ - це частина рівняння, що описує частоту, з якою частинки з діаметром (L, λ) стикаються і формують об'єм $L^3 + \lambda^3$. $b(t, L|\lambda)$ - є функцією розподілу фрагментів, яка описує частоту утворення частки діаметра L від дроблення частки діаметра λ .

$S(t, L)$ - є частотою руйнування частинки діаметра L . $B(t, L)$ – швидкість зародження та $G(t, L)$ швидкість утворення.

Доданки в правій частині рівняння (2.1) мають різний зміст наступним чином (число відповідає умовам):

- 1) Поява нових частинок діаметром L через зародження.
- 2) Створення частинок діаметром L за рахунок зростання менших частинок.
- 3) Зародження частинок діаметром L за рахунок агрегації двох менших частинок діаметром $(L^3 - \lambda^3)^{1/3}$ і λ .
- 4) Загибель частинок діаметром через агрегацію частинок діаметра L та частинок будь-якого діаметра λ .
- 5) Народження частинок діаметром L через руйнування більших частинок діаметру λ .
- 6) Загибель частинок діаметром L через руйнування.

2.2.1 Числові рішення моделі балансу популяції

Зважаючи на складність структури рівняння балансу популяції, отримання аналітичного рішення рівнянь балансу популяції (РБП) стає майже неможливим, але лише для кількох конкретних випадків з найбільш ідеалізованими ситуаціями. Тому чисельні методи часто використовуються для розв'язання рівняння балансу популяції, і в літературі існує багато чисельних методів як спроб розв'язати різні типи рівнянь балансу популяції. Зазвичай ці числові методи в основному можна розділити на 2 категорії: дискретний метод, метод моментів та метод Монте-Карло (МС). На сьогоднішній день представлено кілька оглядових літератур доступних чисельних методів [15].

2.2.2 Дискретний метод

Дискретний метод полягає в наближенні розподілу розміру частинок за допомогою дискретизації внутрішньої координати частинок на набір класів. На кожному інтервалі розмірів вирішується рівняння балансу сукупності. У відкритій літературі опубліковано кілька досліджень, присвячених застосуванню дискретного методу в процесі твердих часток[16]. Класичний дискретний метод вирішення рівняння балансу популяції представлений у вигляді:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = B_0 \delta(L_i - L_0) \quad \text{Утворення} \quad (2.5)$$

$$+ \frac{2G}{(1+r)L_i} \left(\frac{r}{r^2-1} N_{i-1} + N_i - \frac{r}{r^2-1} N_{i+1} \right) \quad \text{Зростання} \quad (2.5)$$

$$+ N_{i-1} \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-i+1} \beta_{i-1,j} N_j + \frac{1}{2} \beta_{i-1,i-1} N_{i-1}^2 - N_i \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-i} \beta_{i,j} N_j - N_i \sum_{j=1}^{n_{eq}} \beta_{i,j} N_j \quad \text{Агрегація} \quad (2.6)$$

$$- S_i N_i + \sum_{j=1}^{n_{eq}} b_{i,j} S_j N_j \quad \text{Руйнування} \quad (2.6)$$

Де, N_i являє собою кількість частинок в діапазоні розмірів L_i, L_{i+1} , також називається дискретною щільністю чисел, n_{eq} і є загальною кількістю інтервалів, r відношення верхньої та нижньої меж розміру для будь-якого інтервалу розміру: $r = \frac{L_{i+1}}{L_i}$.

Де $\beta_{i,j}$ - це злиття ядер між частинками з i -го і j -го інтервалу розміру, і S_i це швидкість вибору для інтервалу $b_{i,j}$ є кількістю фрагментів з інтервалу j , які присвоєні інтервалу i .

Зазвичай для дискретизації розміру частинок використовувалося геометричне співвідношення. Більше інтервалів розміру частинок можна отримати за рахунок збільшення значення q . Але висока точність супроводжується високими витратами на обчислення. У дискретному методі рівняння балансу сукупності вирішується на

кожному окремому розмірі інтервалу. Отже, перевага цієї методики полягає в тому, що підхід безпосередньо представляє результат розподілу частинок. З іншого боку, для досягнення чудової точності потрібна велика кількість інтервалів, що означає неолік величезних витрат на обчислення, особливо для випадків із широким розподілом розміру частинок.

2.2.3 Метод Монте Карло

Метод Монте-Карло (МК) - це чисельна техніка моделювання для вирішення задач за допомогою стохастичного відбору проб [17]. Ця методика, як правило, застосовується для аналізу фізичних систем, де експеримент складний або де рівняння балансу серед популяції неможливо вирішити.

Зазвичай можна виділити дві загальні категорії методів Монте-Карло: метод контролю за часом та метод контролю за подіями. Велика різниця між двома типами методу МК полягає в тому, чи обраний крок часу до події. У першому підході спочатку визначається часовий інтервал, і Монте-Карло використовується для визначення того, яка або скільки подій буде здійснено протягом кроку. А, у керованому подіями методі МК час між подіями обчислюється на основі відомої ймовірності події. Тому цей спосіб не потребує явної дискретизації часу і має перевагу в тому, що крок часу може підлаштовуватися під темп перебігу процесу.

Методи Монте-Карло можна також класифікувати за постійним при моделюванні загальним об'ємом або кількістю частинок: метод МК з постійним об'ємом та метод постійної кількості. Метод МК з постійним обсягом, коли використовується достатня кількість частин імітаційного моделювання, використовується, щоб мінімізувати статистичні помилки. Однак якщо загальний об'єм моделювання буде підтримуватися постійним, то в процесі моделювання загальна кількість частинок буде збільшуватися або зменшуватися, що, очевидно, впливає на точність методу Монте-Карло та час обчислення. Для вирішення цієї задачі розроблений метод постійного числа МК, в якому кількість частинок залишається однаковою. Ця методика розширює або стискає фізичний об'єм,

представлений симуляцією, щоб постійно підтримувати об'єм реакції, що містить постійну кількість частинок.

Порівнюючи з дискретним методом, метод МК може вирішувати наступні проблеми:

- Коли немає інформації про історію кожної частинки;
- Коли мають бути розв'язані багатовимірні системи,
- Ще однією очевидною перевагою є те, що дискретизація є непотрібною, коли

моделюється явно тільки вибіркова сукупність. Однак, якщо потрібна висока точність, також може призвести до високих витрат на обчислення.

2.3 Модель обчислювальної динаміки рідин

Нещодавно, за рахунок швидкого розвитку комп'ютерів, була винайдена нова модель - обчислювальна динаміка рідин (ОДР), яка має великий потенціал у наданні детальної інформації про складну динаміку у псевдо зрідженому шарі. Загалом, існують дві різні категорії ОДР-моделей, що використовуються для моделювання руху частинок у грануляторі з псевдозрідженим шаром: Ейлерові моделі та моделі Лагранжа.

Багатофазна модель потоку Ейлера-Ейлера розглядає кожну фазу як окрему взаємодіючу континууму в спільній обчислювальній області з використанням модифікованого рівняння Нав'є-Стокса, тоді як об'єм кожної фази не може бути зайнятий іншою фазою. У цій моделі тверді частинки, як правило, вважаються ідентичними, що мають репрезентативний діаметр і щільність. Недоліком є те, що взаємодія частинка-частинка повинна моделюватися за допомогою середнього напруження, застосованого до дисперсної фази. Для опису напруженості фазових часток в Ейлерово-Ейлеровому підході була використана кінетична теорія гранульованого потоку (КТГП), яка була розроблена для моделювання руху щільної вибірки майже еластичних сферичних частинок.

Лагранжева модель вирішує рівняння руху для кожної частинки з урахуванням зіткнень частинок та сил, що діють на частинку газом, що дозволяє вивчати вплив

різних властивостей частинок на рух рідини та користується популярність у вчених. Зважаючи на обчислювальні обмеження, моделлю Лагранжа все ще не вдається відстежити більше ніж мільйон частинок за усереднений час моделювання, хоча останні досягнення в обчисленні здаються дуже перспективними.

Ейлерово-Ейлерова модель багатофазного потоку використовується для імітації зернистого потоку в грануляторі з псевдозрідженим шаром та дозволяє включати кілька фаз вторинних твердих тіл. Таким чином, модель розв'язує набір рівнянь моменту імпульсу, що змушує цей підхід бути одним з найскладніших за обчислювальними витратами.

З'єднана модель ОДР-МБП, як правило, при розробці моделей балансу популяції використовується припущення про просторово гомогенну (добре змішану) систему. Для жорсткого обліку явищ, пов'язаних з частинками (наприклад, агрегації та розривів), МБП може бути вирішена разом із рівняннями моменту імпульсу, що дає величезний потенціал комбінованих досліджень ОДР-МБП. Однак ця поєднана модель має той самий недолік, що і модель ОДР – великий об'єм обчислювального часу.

Виходячи з аналізу, наведеного вище, моделювання ОДР представляє величезні переваги щодо прогнозування багатофазного потоку грануляції з псевдозрідженим шаром, в той час як основний недолік - великі обчислювальні затрати. Наприклад, для обчислення 30 - секундного процесу в реальному часі моделювання ОДР-МБП займає майже 60 днів.

Рівняння балансу популяції надзвичайно складні. За винятком особливих обставин, майже неможливо отримати аналітичні рішення для рівнянь, тому, як правило, вони вирішуються чисельними методами.

2.4 Багатокомпонентна МБП

Виходячи з аналізу, наведеного вище, моделювання ОДР представляє величезні переваги щодо прогнозування багатofазної гідродинаміки потоку грануляції з псевдозрідженим шаром, в той час як вони мають основні проблеми величезної обчислювальної вартості та відсутністю постійного виводу для моделі, що є важливим для управління системою на основі моделей.

Багатокомпонентна МБП модель використовується як аналог для скорочення обчислювального часу і для того, щоб враховувати місцеву гідродинаміку різних ділянок гранулятора з псевдозрідженим шаром. У моделі Багатокомпонентної МБП гранулятор з псевдозрідженим шаром поділяється на різні відділення відповідно до дослідження динаміки газотвердої рідини.

Кожна область передбачається однорідною, на основі якої реалізується одновимірний МБП для кожної області для прогнозування місцевого росту частинок та еволюції розподілу розміру частинок, враховуючи частинки, що взаємодіють між сусідніми регіонами.

Кількість регіонів визначається експериментальним вимірюванням, моделюванням ОДР або емпіричним досвідом. Таїчіулі [18] розділив гранулятор з псевдозрідженим шаром на три різні зони: змочувальну зону, ізотермічну зону та зону перенесення шляхом експериментального вимірювання вологості шару.

Двоступінна МБП була розроблена в їх роботі, розглядаючи зростання шару і агломерації частинок в зоні, що активно змочується. Двохкамерне МБП - дослідження грануляції з псевдозрідженим шаром Вурстера з дном розпилення було проведено з урахуванням зростання частинок у відділенні для розпилення.

Було розділено гранулятор з псевдозрідженим шаром на два відділення: зону обприскування та зону відпадання. Фундаментальне дослідження двокомпонентної моделі МБП було проведено, розглянувши агломерацію частинок, що відбувається в зоні обприскування, та порівняно з однокомпонентним МБП.

Однак, вся локальна динаміка рідини газових частинок і передача частинок, описаних вище, засновані на емпіричному рівнянні, і на сьогоднішній день,

наскільки відомо не було знайдено багаточастинкових досліджень у поєднанні з моделюванням ОДР при дослідженні грануляційного шару.

2.5 Трьохфазна МБП

Відповідно до механізмів гранул, що відбувалися в різний період часу, процес грануляції з псевдозрідженим киплячим шаром можна розділити на кілька етапів. За допомогою попереднього експериментального дослідження середнього розміру гранул процес грануляції розбризкування шару поділяється на три стадії з часовим відсотком та механізмами грануляції наступним чином:

I стадія (перші 30% часу експерименту) - зростання шару і агрегація,

II стадія (середина 40% часу експерименту) - агрегація,

III стадія (останні 30% часу експерименту) - агрегація та обрив. На кожному етапі використовується модель балансу популяцій для опису еволюції розподілу розміру гранул на основі відповідних механізмів грануляції.

На величини ядер впливають умови роботи процесу грануляції, і як тільки умови експлуатації незмінні, то значення констант ядра, що використовуються в МБП кожного етапу, фіксуються.

Висновки до розділу

Існує багато моделей коалесценції в яких розглядають, чи відскочить частинка або злипнеться під час зіткнення.

Модель балансу популяції (МБП) використовується для опису зміни гранулометричного складу гранульованого псевдозрідженого шару в великій кількості робіт протягом десятиліть. Розглянуто методи рішення МБП дискретним методом та методом Монте-Карло. Порівнюючи з дискретним методом, метод МК може вирішувати наступні проблеми:

- Коли немає інформації про історію кожної частинки;
- Коли мають бути розв'язані багатовимірні системи,

- Ще однією очевидною перевагою є те, що дискретизація є непотрібною, коли моделюється явно тільки вибіркова сукупність. Однак, якщо потрібна висока точність, також може призвести до високих витрат на обчислення.

Виходячи з аналізу, наведеного в розділі, моделювання ОДР представляє величезні переваги щодо прогнозування багатофазного потоку грануляції з псевдозрідженим шаром, в той час як основний недолік - великі обчислювальні затрати. Наприклад, для обчислення 30 - секундного процесу в реальному часі моделювання ОДР займає майже 60 днів.

Багатокомпонентна МБП використовується як аналог для скорочення обчислювального часу і для того, щоб враховувати місцеву гідродинаміку різних ділянок гранулятора з псевдозрідженим шаром.

У моделі Багатокомпонентної МБП гранулятор з псевдозрідженим шаром поділяється на різні відділення відповідно до дослідження динаміки газотвердої рідини. Кількість регіонів визначається експериментальним вимірюванням, моделюванням ОДР або емпіричним досвідом.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ В АПАРАТІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ

3.1 Аналіз моделювання гранулятора з псевдозрідженим шаром

Основним об'єктом керування у даній магістерській дисертації являється гранулятор з псевдозрідженим шаром, призначення якого є зневоднення та гранулювання добрив.

Найголовнішими чинниками які впливають на роботу гранулятора є:

- витрати вихідного сировини для отримання готового продукту;
- швидкість циркуляції повітря у грануляторі;
- поруватість потоку гранул;
- теплоємність гранул;
- теплота пароутворення.

Температура частинок має ще одне значення: вона визначає необхідну післяобробку твердого продукту, наприклад охолодження, необхідне до того, щоб продукт був упакований і відправлений.

Нагрівання - це затратний підпроцес, тому загальна вартість виробництва значно зросте, якщо частинки будуть нагріватися без необхідності. Однак це необхідно, оскільки випаровування ведеться термічно, і недостатнє нагрівання (тобто недостатнє випаровування рідини) призведе до аглютинації шару, перетворення киплячого шару в нерухомий шар.

Для того, щоб можна було передбачити та контролювати температуру, тепло та масова передача під час грануляції розпилення повинні бути змодельовані. Процес сушіння, який лежить в основі процесу грануляції, багато разів був теоретично та експериментально досліджений з різними деталями[19].

Однією з найсучасніших моделей сушіння є модель Бургешвейдера, що враховує розподіл кількості частинок, вологості частинок та ентальпії частинок щодо часу перебування частинок в апараті[20]. Крім того, розглядається розподіл відносно просторового положення в апараті. Хоча, як відомо, ця модель дає чудові результати, вона занадто складна для проектування контролера в контексті цієї тези.

Отже, з огляду на бажання отримати динамічну модель для проектування контролера, тобто контролювати температуру частинок, виводиться спрощена модель. Основне припущення полягає в тому, що в апараті немає розподілу вологи або температури, тобто всі частинки мають однакову середню вологість і середню температуру.

Це припущення можна виправдати сильним перемішуванням у киплячому шарі, що призведе до вирівнювання розподілу вологи та температури.

Для спрощеної моделі теплопередачі для проектування контролера зроблені наступні припущення:

- система ідеально поєднана;
- нехтування утворенням бульбашок та його впливом на тепло- і масообмін;
- вологість у системі не розглядається як фаза. Її завжди розглядають як частину твердої фази (у рідкій формі), або як частину газової фази (у її паровій формі);
- всі температури - це температури перемішування, тобто температура комбінації твердого і рідкого, і газу, і пари відповідно. З залишків маси сухої твердої речовини, маси рідини на твердому тілі, маси сухого газу, маси пари в газі, ентальпії частинки (тобто твердого і рідкого), і температури газу (тобто газ і пара).
- створена модель повинна бути стабільною та керованою.

3.2 Дослідження гранулятора добрив з псевдозрідженим шаром

Під час дослідження було синтезовано два диференціальні рівняння які описують роботу гранулятора:

$$\begin{aligned} \varepsilon \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T_r}{\partial t} + V_r \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_r}{\partial x} = \varepsilon \cdot a \cdot \frac{\partial^2 T_r}{\partial y^2} - \alpha \cdot F \cdot (T_r - T_{p+n}) + \\ + G_p \cdot (1 - x_p) \cdot (r + C_n T_{p+n}), \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T_{n+p}}{\partial t} - V_{n+p} (1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_{n+p}}{\partial x} = \alpha \cdot F \cdot (T_r - T_{n+p}) -$$

$$-G_p(1 - x_p)(r + C_n T_{p+n}) + G_p x_p q. \quad (3.2)$$

Де:

T_Γ – температура теплоносія, К;

T_{p+n} – температура розчину та пару (гранул), К;

ε – поруватість потоку гранул; ρ – густина гранул, кг/м³;

C, C_n - теплоємність гранул, Дж/(кг · К);

V_Γ, V_{p+n} – швидкості теплоносія та розчину та пару (гранул), м/с;

r – теплота пароутворення, Дж/кг;

q – теплота, що виділяється під час кристалізації розчину, Дж/кг;

α - коефіцієнт тепловіддачі, 1/с;

G_p - витрати вихідного розчину, м³/с;

x_p - концентрація вихідного розчину;

x, y – висота та ширина апарата, м;

a - коефіцієнт горизонтальної температуропровідності, м²/с;

F - площа газорозподільної решітки, м².

Під час створення моделі були створені такі допущення:

- Рух частинок за умовою двохфазного руху;
- Не враховується зміна температури по ширині апарату, а тільки по висоті;
- Тепло, яке внесено в шар, точно вистачить для повного випару рідини;
- Утворення бульбашкового шару не враховується.

Таблиця 3.1 - Параметри для контрольного прикладу

| № | Назва показника | Умовне позначення | Величина |
|---|---|-------------------|--|
| 1 | Коефіцієнт тепловіддачі, 1/с | α | 5,5 |
| 2 | Густина гранул | ρ | 1230 |
| 3 | Коефіцієнт вертикальної температуропровідності, м ² /с | a | $2,7 \cdot 10^{-4} - 12,5 \cdot 10^{-4}$ |
| 4 | Витрати вихідного розчину, м ³ /с | G_p | 0,0017 |
| 5 | Концентрація вихідного розчину | x_p | 0,4 |
| 6 | Теплоємність гранул, Дж/(кг·К) | C_p | 1630 |

Таблиця 3.2 - Геометрія шару та початкові умови, що використовуються у розрахунках

| № | Назва | Умовне позначення | Величина | Розмірність |
|---|--|-------------------|----------|----------------|
| 1 | Висота рухомого шару | x | 0,8 | м |
| 2 | Ширина апарату | y | 0,3 | м |
| 3 | Висота апарату | H | 2 | м |
| 4 | Площа газорозподільної решітки | F | 4,9 | м ² |
| 5 | Початкова температура шару | T_0 | 293 | К |
| 6 | Вхідна температура теплоносія | $T_{Гвх}$ | 503 | К |
| 7 | Вихідна температура повітря | $T_{Гвих}$ | 373 | К |
| 8 | Мінімальна поруватість псевдозрідженого шару | ε | 0,4 | |

Для розв'язання кожного рівняння був застосований метод Рунге-Кутта 4 порядку. Методи Рунге - Кутта - великий клас чисельних методів розв'язання задачі Коші для звичайних диференціальних рівнянь і їх систем.

До набору методів Рунге - Кутта відносять метод Ейлера та та модифікований метод Ейлера з перерахунком що відповідно дорівнює першому та другому порядку точності. Але існують методи інших порядків точності, що не набули популярності в порівнянні з методом Рунге - Кутта 4 порядку. Він найбільш часто використовується для розв'язання диференціальних рівнянь, та реалізований в таких пакетах як MATLAB, MATHCAD. Якщо виникає необхідність більшої точності, то використовуються методи більших порядків: 5 та 6 відповідно, що пов'язано з вищою складністю обчислень, та вимагає більше ресурсів[21].

Метод Рунге – Кутта 4 порядку настільки поширений серед методів розв'язань, що його часто називають просто методом Рунге – Кутта, без наголошення який порядок використовується.

Розглянемо задачу Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$y' = f(x, y), y(x_0) = y_0 \quad (3.3)$$

Тоді наближене значення в наступних ітераціях буде вираховуватися за ітераційною формулою:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.4)$$

Обчислення нового значення проходить в 4 стадії

$$k_1 = fh(x_n, y_n), \quad (3.5)$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{h}{2}y_n, y_n + \frac{h}{2}k_1\right), \quad (3.6)$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{h}{2}y_n, y_n + \frac{h}{2}k_2\right), \quad (3.7)$$

$$k_4 = f(x_n + hy_n, y_n + hk_3), \quad (3.8)$$

де h – величина кроку в сітці x .

Якщо метод має четвертий порядок точності, це означає що помилка одного кроку має порядок $O(h^5)$, а сумарна помилка на фінальному інтервалі інтегрування має порядок $O(h^4)$.

Розпишемо 1 рівняння, спростивши його та виокремивши a_i як групи перемножених констант заданих в початкових умовах:

$$T_r = T_1; T_{p+n} = T_2; V_r = V_1; V_{p+n} = V_2, \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = -\frac{V_1}{C} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} - \frac{\alpha \cdot F}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} \cdot T_1 + \frac{(\alpha \cdot F + G_p \cdot (1-x_p) \cdot C_n)}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} \cdot T_2 + \frac{G_p \cdot (1-x_p) \cdot r}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} + \frac{a}{\rho \cdot C} \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2}, \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{V_1}{C}, a_2 = -\frac{\alpha \cdot F}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C}, a_3 = \frac{(\alpha \cdot F + G_p \cdot (1-x_p) \cdot C_n)}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} \\ a_4 &= \frac{G_p \cdot (1-x_p) \cdot r}{\varepsilon \cdot \rho \cdot C} + \frac{a}{\rho \cdot C} \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2}, a_5 = \frac{a_1}{\Delta x}; a_{11} = a_2 - a_5. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Використаємо метод Рунге – Кутта 4 порядку для розв'язання першого рівняння:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} + a_2 \cdot T_1 + a_3 \cdot T_2 + a_4, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{a_1}{\Delta x} \cdot T_1^{j+1} - \frac{a_1}{\Delta x} \cdot T_1^j + a_2 \cdot T_1^j + a_3 \cdot T_2 + a_4, \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_{11} \cdot T_1^j + a_3 \cdot T_2 + a_4, \quad (3.14)$$

$$K_1 = h \cdot (a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_{11} \cdot T_1^j + a_3 \cdot T_2 + a_4), \quad (3.15)$$

$$K_2 = h \cdot \left(a_{11} \cdot \left(T_1^j + \frac{1}{2} K_1 \right) + a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_3 \cdot T_2 + a_4 \right), \quad (3.16)$$

$$K_3 = h \cdot \left(a_{11} \cdot \left(T_1^j + \frac{1}{2} K_2 \right) + a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_3 \cdot T_2 + a_4 \right), \quad (3.17)$$

$$K_4 = h \cdot \left(a_{11} \cdot \left(T_1^j + K_3 \right) + a_5 \cdot T_1^{j+1} + a_3 \cdot T_2 + a_4 \right), \quad (3.18)$$

$$T_1^j = T_1^j + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4). \quad (3.19)$$

Тоді маємо для 2 рівняння:

$$(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = V_2(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha \cdot F \cdot T_1 + (-\alpha \cdot F - G_p(1 - x_p)C_n)T_2 - G_p(1 - x_p)r + G_px_pq \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{V_2}{C} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} + \frac{\alpha \cdot F}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C} \cdot T_1 + \frac{(-\alpha \cdot F - G_p(1 - x_p)C_n)}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C} T_2 - \frac{G_p(1 - x_p)r}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C} + \frac{G_px_pq}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C}, \quad (3.21)$$

$$a_6 = \frac{V_2}{C}; a_7 = \frac{(-\alpha \cdot F - G_p(1 - x_p)C_n)}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C}; a_8 = \frac{\alpha \cdot F}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C},$$

$$a_9 = -\frac{G_p(1 - x_p)r}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C} + \frac{G_px_pq}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot C}; a_{10} = \frac{a_6}{\Delta x}; a_{12} = a_7 - a_{10}. \quad (3.22)$$

Застосуємо метод Рунге – Кутта 4 порядку при розв'язанні другого диференційного рівняння:

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_6 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} + a_7 \cdot T_2 + a_8 \cdot T_1 + a_9, \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{a_6}{\Delta x} \cdot T_2^{j+1} - \frac{a_6}{\Delta x} \cdot T_2^j + a_7 \cdot T_2^j + a_8 \cdot T_1 + a_9, \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_{10} \cdot T_2^{j+1} - a_{10} \cdot T_2^j + a_7 \cdot T_2^j + a_8 \cdot T_1 + a_9, \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_{10} \cdot T_2^{j+1} + a_{12} \cdot T_2^j + a_8 \cdot T_1 + a_9, \quad (3.26)$$

$$K_1 = h \cdot (a_{12} \cdot T_2^{j+1} + a_{10} \cdot T_2^j + a_8 \cdot T_1 + a_9), \quad (3.27)$$

$$K_2 = h \cdot \left(a_{12} \cdot \left(T_2^j + \frac{1}{2} K_1 \right) + a_{10} \cdot T_2^{j+1} + a_8 \cdot T_1 + a_9 \right), \quad (3.28)$$

$$K_3 = h \cdot \left(a_{12} \cdot \left(T_2^j + \frac{1}{2} K_2 \right) + a_{10} \cdot T_2^{j+1} + a_8 \cdot T_1 + a_9 \right), \quad (3.29)$$

$$K_4 = h \cdot \left(a_{12} \cdot \left(T_2^j + K_3 \right) + a_{10} \cdot T_2^{j+1} + a_8 \cdot T_1 + a_9 \right), \quad (3.30)$$

$$T_2^j = T_2^j + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4). \quad (3.31)$$

3.3 Створення програмного продукту для моделювання

Python - інтерпретована мова програмування: це значить, що первинний код частинами трансформується в машинний в процесі виконання спеціальною програмою - інтерпретатором. Код на цій мові програмування досить легко читається, тому що в ньому небагато допоміжних елементів, а через правила синтаксису мови програмісти змушені робити відступи. Зрозуміло, що добре оформлений текст з малою кількістю відволікаючих елементів читати і розуміти легше.

Ніхто не любить надмірно складні речі, тому простота використання Python є однією з головних причин, чому він настільки популярний для використання. Завдяки простому синтаксису, який легко читається, він робить його улюбленим як досвідченим розробникам, так і студентам у експериментальних цілях. Простота Python означає, що розробники можуть зосередитись на фактичному вирішенні проблеми, а не на розумінні лише технічних нюансів мови.

На додаток до цього, Python також є надзвичайно ефективним. Це дозволяє розробникам виконувати більше роботи, використовуючи менше рядків коду. Код Python також легко зрозумілий людям, навіть які не працювали до цього з ним.

Python вже досить популярний, а отже, він має сотні різних бібліотек та фреймворків, якими можуть користуватися розробники. Ці бібліотеки дійсно корисні для економії часу, що, в свою чергу, робить Python ще більш популярним.

Python існує з 1990 року, і це достатньо часу для створення спільноти, що його підтримує. Завдяки цій підтримці студенти, які навчаються на Python, можуть легко вдосконалити свої знання, що лише призводить до зростання популярності.

Крім того, корпоративна підтримка є дуже важливою частиною успіху Python. Багато кращих компаній, таких як Google, Facebook, Instagram, Netflix, Quora і т.д., використовують Python для своїх продуктів. Насправді Google несе відповідальність за створення багатьох бібліотек Python для машинного навчання, таких як Keras, TensorFlow тощо.

Також є багато різних платформ, які підтримують Python, такі як Windows, Macintosh, Linux, Solaris і т.д.

Створений програмний продукт розв'язує вище наведені рівняння Рунге-Кутта 4 порядку(рис 3.1),

```

120 for i in range(n):
121     for j in range(1, 9):
122         K1 = h*(a5*T1[j+1]+a11*T1[j]+a14*T1[j]-2*a14*T1[j]+a14*T1[j]+a3*T2[j]+a4)
123         K2 = h*(a11*(T1[j]+0.5*K1)+a5*T1[j+1]+a14*T1[j]-2*a14*T1[j]+a14*T1[j]+a3*T2[j]+a4)
124         K3 = h*(a11*(T1[j]+0.5*K2)+a5*T1[j+1]+a14*T1[j]-2*a14*T1[j]+a14*T1[j]+a3*T2[j]+a4)
125         K4 = h*(a11*(T1[j]+K3)+a5*T1[j+1]+a14*T1[j]-2*a14*T1[j]+a14*T1[j]+a3*T2[j]+a4)
126
127         T1[j] = T1[j]+(K1+2*K2+2*K3+K4)/6
128
129         RK1 = h*(a12*T2[j]+a10*T2[j+1]+a8*T1[j]+a9)
130         RK2 = h*(a12*(T2[j]+0.5*RK1)+a10*T2[j+1]+a8*T1[j]+a9)
131         RK3 = h*(a12*(T2[j]+0.5*RK2)+a10*T2[j+1]+a8*T1[j]+a9)
132         RK4 = h*(a12*(T2[j]+RK3)+a10*T2[j+1]+a8*T1[j]+a9)
133         T2[j] = T2[j]+(RK1+2*RK2+2*RK3+RK4)/6
134

```

Рисунок 3.1 – Код розв'язку диференціальних рівнянь

Програма створює масив даних, який завантажує в excel файл(рис 3.2, рис 3.3)

```

96 def excel_row(sheet_num):
97     global e_row_0, e_row_1
98     if sheet_num == 0:
99         e_row_0 += 1
100         return e_row_0
101     elif sheet_num == 1:
102         e_row_1 += 1
103         return e_row_1
104

```

Рисунок 3.2 – Функція нумерації рядків в excel файлі

```

152 # Create a new chart object.
153 chart_1 = workbook.add_chart({'type': 'line'})
154 chart_2 = workbook.add_chart({'type': 'line'})
155 chart_3 = workbook.add_chart({'type': 'line'})
156 chart_4 = workbook.add_chart({'type': 'line'})
157
158 # Add a series to the charts.
159 chart_1.add_series({'values': '=T1!$A$4:$A$'+str(int(n/100+3))})
160 chart_1.add_series({'values': '=T1!$B$4:$B$'+str(int(n/100+3))})
161 chart_1.add_series({'values': '=T1!$C$4:$C$'+str(int(n/100+3))})
162 chart_1.add_series({'values': '=T1!$D$4:$D$'+str(int(n/100+3))})
163 chart_1.add_series({'values': '=T1!$E$4:$E$'+str(int(n/100+3))})
164 chart_1.add_series({'values': '=T1!$F$4:$F$'+str(int(n/100+3))})
165 chart_1.add_series({'values': '=T1!$G$4:$G$'+str(int(n/100+3))})
166 chart_1.add_series({'values': '=T1!$H$4:$H$'+str(int(n/100+3))})
167 chart_1.add_series({'values': '=T1!$I$4:$I$'+str(int(n/100+3))})
168 chart_1.add_series({'values': '=T1!$J$4:$J$'+str(int(n/100+3))})
169 chart_2.add_series({'values': '=T1!$B$'+str(int(n/100+3))+':$I$'+str(int(n/100+3))})
170

```

Рисунок 3.3 – Код завантаження даних в excel файл

моделює створену систему та на виході отримуємо графіки залежності температури теплоносія T1, від часу гранулювання за висотою апарату рис.3.4 та температури гранул T2 від часу гранулювання за висотою апарату рис 3.6.

Також рис.3.5 та рис. 3.7 являються так званими профілями температур, що відповідає останній ітерації розв’язку системи рівнянь Рунге-Кутта.

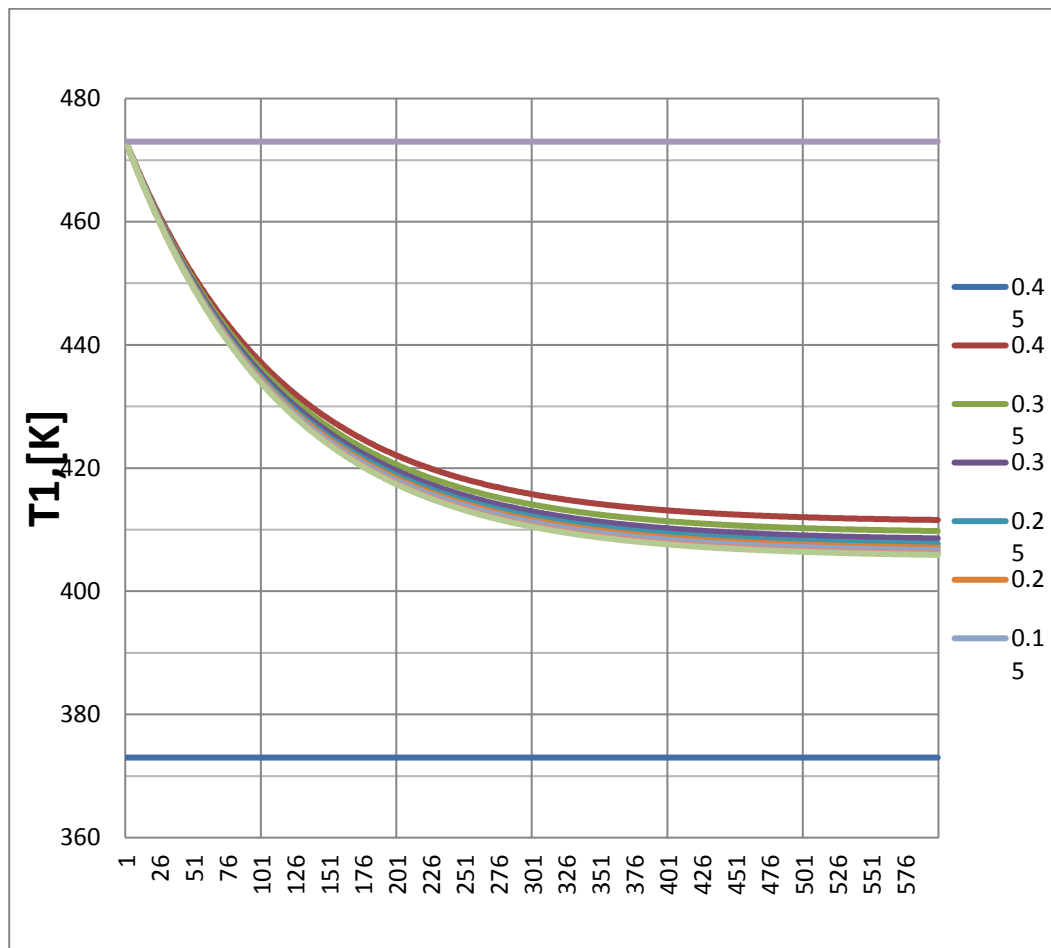


Рисунок 3.4 – Температура гранул на різній висоті в апараті

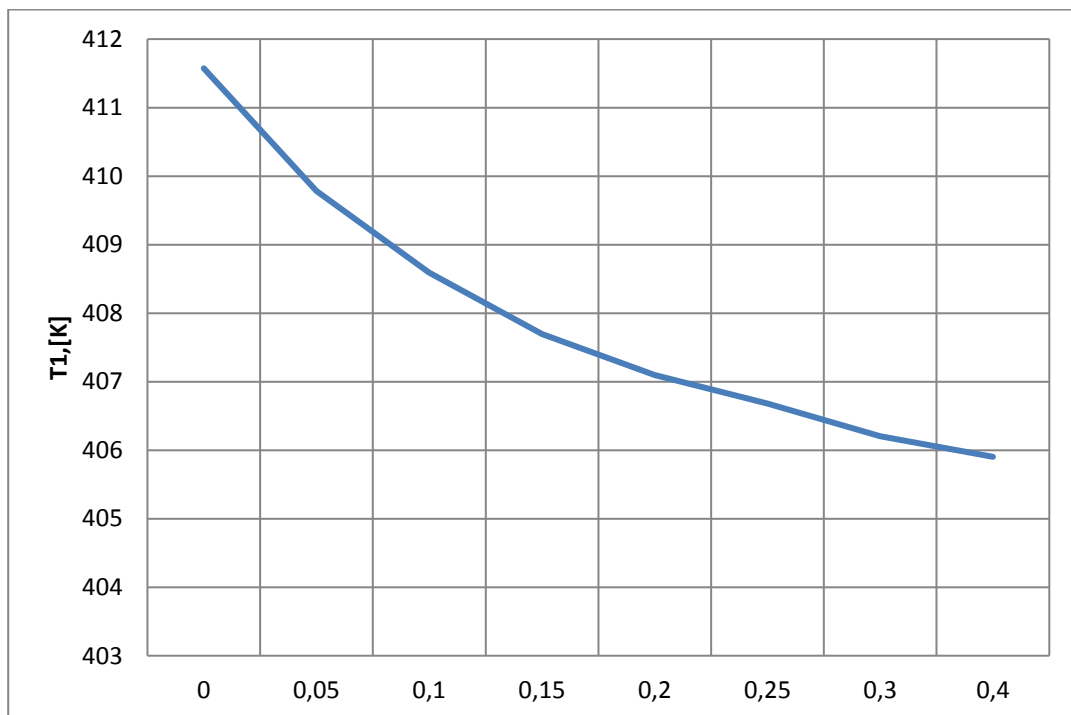


Рисунок 3.5 – Профіль температури теплоносія на різній висоті в апараті

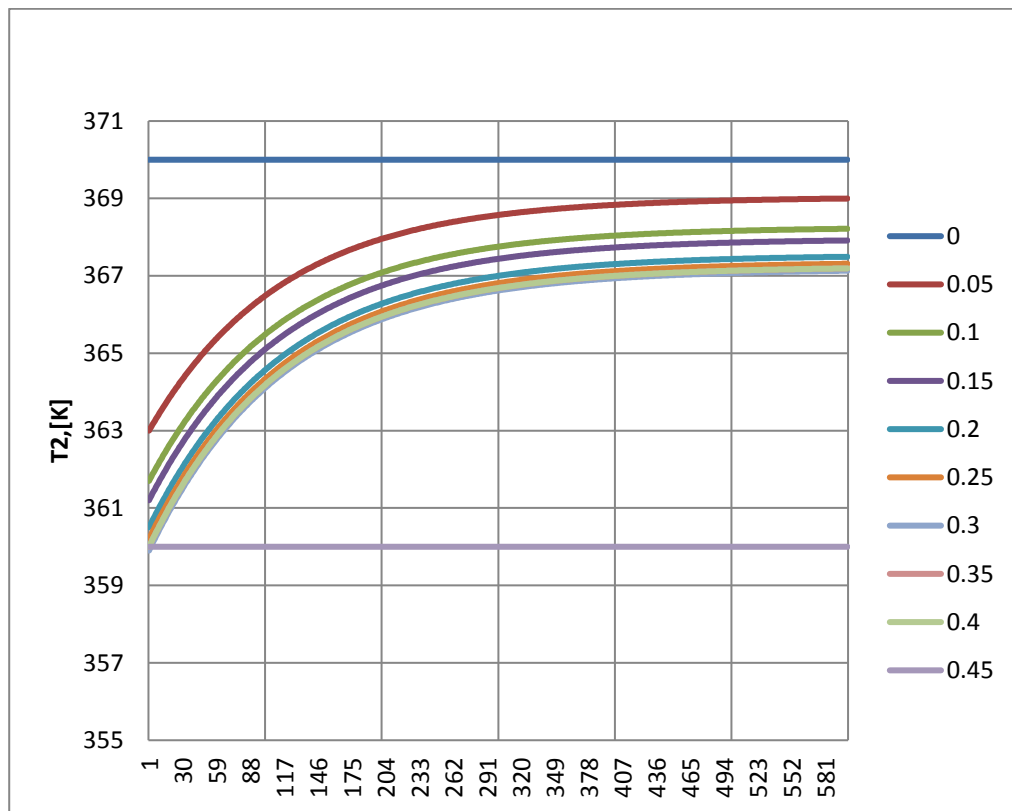


Рисунок 3.6 – Температура гранул на різній висоті в апараті

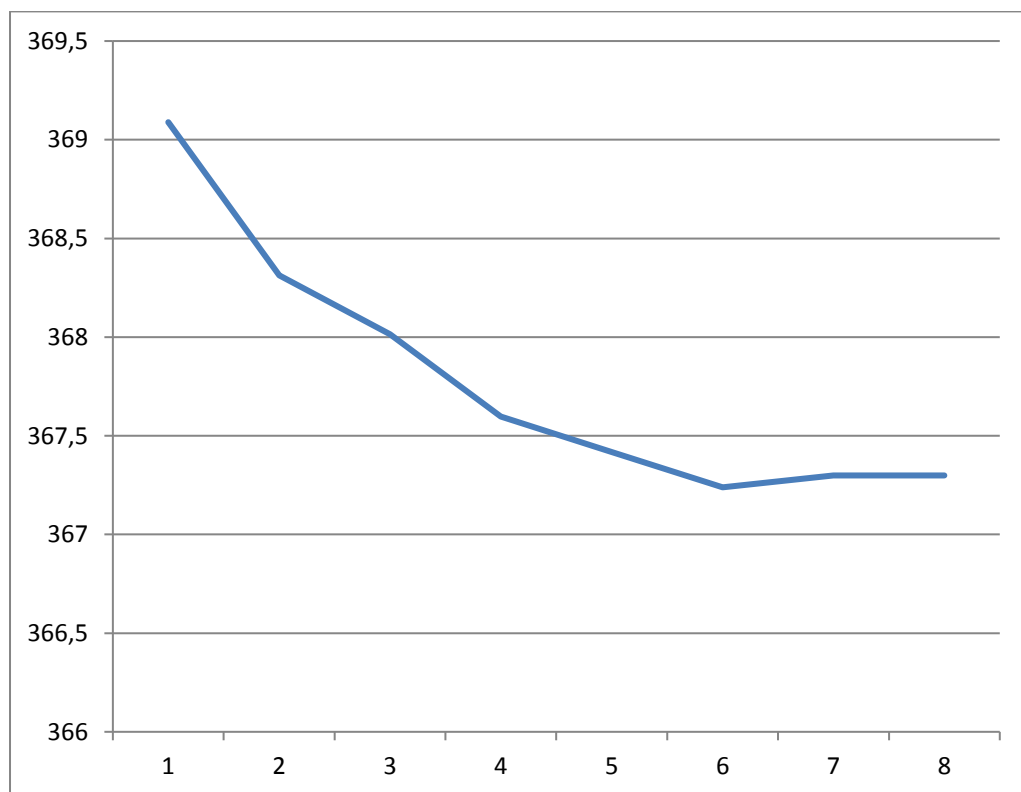


Рисунок 3.7 – Профіль температури гранул на різній висоті в апараті

Висновки розділу

Під час дослідження було синтезовано два диференційні рівняння які описують роботу гранулятора.

Мовою програмування Python було реалізовано програмний продукт, який розв'язує вище наведені рівняння Рунге-Кутта 4 порядку

За графіками можна очевидно визначити, що створена система керована та стабільна. Спад температури теплоносія від 480 К до 410 К, а підвищення температури гранул тільки з 360 до 370 (тільки на 10 градусів) характерне для такого апарату тим, що йдуть витрати тепла на нагрівання повітря у самому апараті та стінок апарату.

Робоча температура апарату 10-15 градусів, що відповідає технологічним вимогам при створенні гранулятора з псевдозрідженим шаром.

4 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ГРАНУЛЯЦІЇ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

4.1 Поняття та принцип роботи регулятора

Грануляція з псевдозрідженим шаром - це складний процес взаємодії, на який впливає велика кількість факторів: експлуатаційні змінні, властивості матеріалу та параметри обладнання. Будь-яка тонка зміна цих змінних може призвести до значного погіршення якості кінцевих гранул і призвести до енергетичних та матеріальних відходів. Тому необхідна точна стратегія контролю для поліпшення якості кінцевих гранул та послідовності процесу грануляції.

Кожний раз, коли результат процесу, у разі процесу грануляції розбризкуванням з псевдозрідженим шаром, наприклад, розподіл розміру частинок або вологість частинок, не відповідає необхідним технічним умовам, умови процесу повинні бути змінені таким чином, щоб технічні умови були виконані. Важливими завданнями є ідентифікація відповідних входних процесів, змінних та визначення співвідношення, яке модифікує входи, що відповідають поточній помилці в процесі стосовно специфікації. Помилка визначається за допомогою певних результатів процесу, які згодом будуть називатися керованими змінними. Вони визначають властивості, наприклад вміст вологи в частинці. У абстрактних умовах будь який процес, що розглядається, може бути представлений як:

$$y = PU + d, \quad (4.1)$$

де y позначає керовані змінні,

P - абстрактне зображення процесу; зовнішні входи в процес, перетворюються процесом в керовані змінні, залежно від вихідних порушень, включених у d . Завдання полягає в тому, щоб визначити відношення, яке генерує послідовність процесових входів u таким чином, щоб необхідний результат y отримувався від процесу P , навіть якщо є порушення процесу d .

Один із способів модифікувати керовані змінні таким чином, щоб отримати визначені результати процесу - це використання механізмів управління. Загалом вони поділяються на дві групи: керування відкритим контуром та контроль зворотного зв'язку (також: контроль із закритим циклом). У керуванні з відкритим контуром вхідні процеси u визначаються законом управління

$$u = C * r, \quad (4.2)$$

де C - абстрактне подання контролера відкритого циклу, а r - бажаний результат процесу. Цей процес зображено на (рис. 4.1).

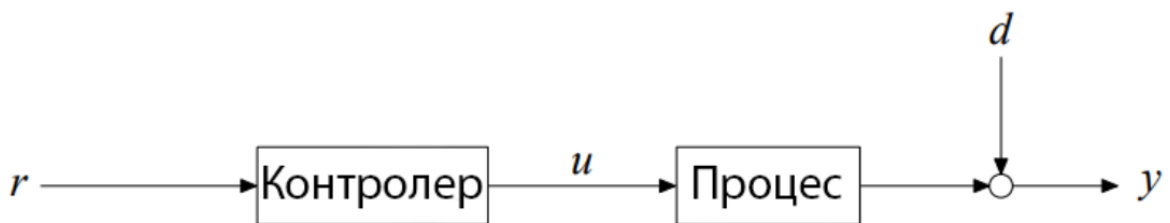


Рисунок 4.1 - Конфігурація керування відкритим контуром: входи u процес обчислюються виключно на основі опорного сигналу r .

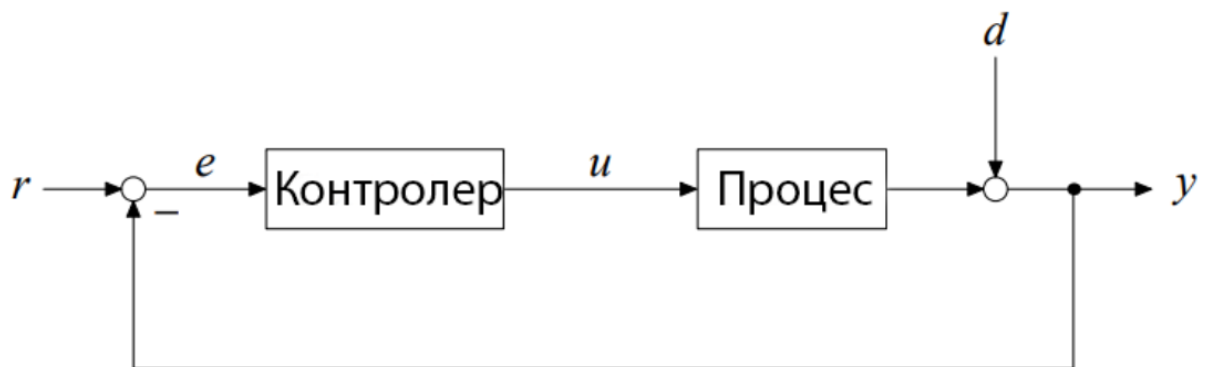


Рисунок 4.2 - Конфігурація управління із закритим контуром

Процес обчислюються на основі відхилення між керованим виходом y та опорним сигналом r . Це дозволяє виявити дрейф у контрольованих змінних, наприклад, через порушення.

В ідеалі, при припущенні, що $d = 0$, контролер C може бути обраний як обернений

$$C: P^{-1} C = P * P^{-1} * r = r \quad (4.3)$$

даючи ідеальний контроль процесу. Однак на практиці сигнал збудження d не дорівнює нулю, і, таким чином, залишається керуюча помилка: $y = r + d$, r . Оскільки зміщення в керованій змінній контролером не виявлено, ця конфігурація може призвести до незадовільних результатів. Крім того, процес P , а отже, P^{-1} , точно не відомий, є лише досить точне наближення. Це додатково вводить помилки в контролі, які не компенсуються.

Навіть якщо впливом помилок можна знехтувати, контролер C може бути практично нереалізованим, залежно від властивостей процесу P . Для усунення цих проблем контрольовані змінні y можуть бути виміряні та повернуті назад до контролера. Ця конфігурація зображена на (рис. 4.2). Як видно, вхід до контролера тепер вже не є опорним сигналом, а помилка $e = r - y$, тобто маніпульовані змінні обчислюються на основі відхилення поточного стану процесу від бажаного стану процесу.

Використання цього зміщення конфігурації в керованих змінних, наприклад, через порушення, виявляється контролером і входи процесу змінюються відповідно, тобто управління зворотним зв'язком має властиву здатність компенсувати порушення. Основне припущення щодо використання механізмів управління полягає в тому, що керовані змінні y прямо піддаються вимірюванню для того, щоб можна було реалізувати закон управління. Якщо тільки підмножина y може бути виміряна безпосередньо, а вся інша інформація може бути отримана лише у вигляді вимірювання z , відсутня інформація про процес повинна бути реконструйована з z , наприклад, за допомогою модельної системи вимірювань.

Залишається завданням - розробити відповідний контролер C , який, як правило, є динамічною системою, що дасть бажаний результат процесу. Основою для всіх наступних етапів є динамічна модель процесу[22]. Потім контролер

розробляється з використанням інформації про процес i , таким чином, є модельним контролером.

Основні вимоги до контуру управління (у порядку зменшення)

- Стабільність: Для концепції стійкості існує кілька визначень, які будуть обговорені згодом. Загальне завдання полягає в тому, щоб гарантувати, що кінцеві екзогенні сигнали (наприклад, посилення, порушення) приносять лише кінцеві зміни всіх внутрішніх і зовнішніх сигналів, наприклад вимірюваних та керованих змінних. Послаблення збурень: для класів, що стосуються d , стаціонарна помилка e повинна зникнути, тобто не повинно бути стійкої помилки в контрольному результаті[23].

- Цю вимогу можна виконати за допомогою відповідного вибору структури контролера залежно від структури процесу.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} r(t) - y(t) = 0 \quad (4.4)$$

- Динаміка: перехід процесу між двома станами, наприклад повернення у початковий стан після виникнення порушення, повинен бути досить швидким.

- Надійність: три вимоги повинні бути виконані, навіть якщо модель процесу, що використовується в дизайні контролера, містить помилки порівняно з реальним процесом, наприклад, через невідому кінетику процесу або спрощення складної, але точної моделі процесу.

Виходячи з характеру сигналу можна визначити два типи керуючих завдань:

Перше - стабілізація або ослаблення збурень: Опорний сигнал є постійним і контролер зобов'язаний зберігати цей стан шляхом протидії порушень.

Друге завдання називається наступним за моделлю: Тут динамічний процес породжується довідковою траєкторією, а завдання контролера - визначити необхідні входи в процес таким чином, щоб він слідував як можна ближче.

Це завдання потрібно виконати, наприклад, якщо процес повинен бути переведений з одного стаціонарного стану в інший. Тут посилення формується таким чином, що процес не досягає станів між двома стійкими станами, які можуть порушувати вимоги безпеки. Найважливішою вимогою до контуру управління є

стабільність, особливо якщо сам процес нестабільний. Два встановлені визначення допомагають зробити інтуїтивне поняття стабільності більш точним: стабільність вводу-виводу та стабільність стану.

Динамічний процес:

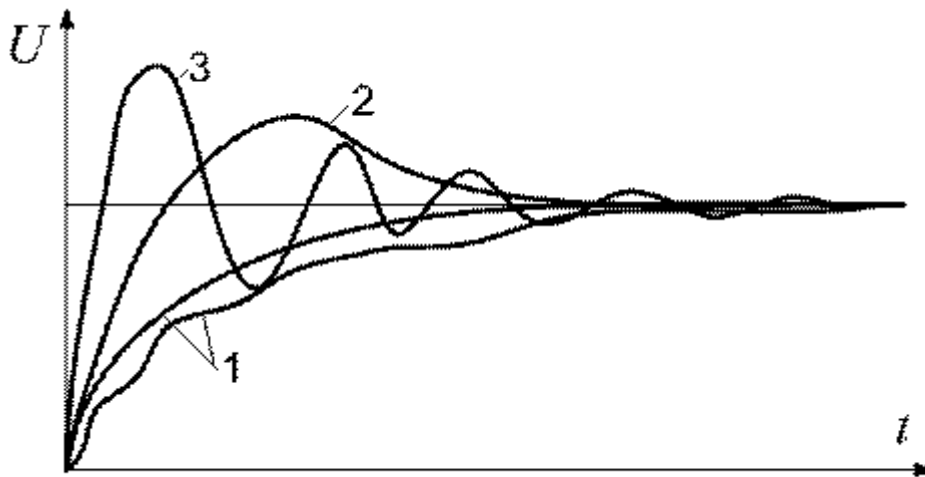
$$y = P * U \quad (4.5)$$

називається стабільним, якщо кінцеві входні сигнали U створюють лише кінцеві вихідні сигнали y , тобто обмежені входи дають обмежені виходи. Це визначення, хоча і є корисним для багатьох класів процесів, не дає інформації про стійкість внутрішніх сигналів, тобто сигналів y процесі P , які не вимірюються. Нестабільність з точки зору необмежених, вимірюваних сигналів у процесі не виявляється.

4.2 Перехідний процес системи

В електротехніці та машинобудуванні перехідний процес - це реакція системи на зміну одного усталеного режиму на інший. перехідний процес не обов'язково пов'язаний з різкими подіями, але з будь-якою подією, яка впливає на рівновагу системи[24].

В залежності від вигляду та характеру розрізняються такі процеси рис (4.3):



- 1) монотонний;
- 2) аперіодичний;
- 3) коливальний.

Рисунок 4.3 – Типи перехідних процесів

Найважливіші характеристики які будуть використовуватися в роботі з оцінкою перехідних процесів:

- Перерегулювання – це максимальне відхилення від заданого сталого значення по амплітуді. Чим більше перерегулювання тим більше система здатна до коливань.

- Ступінчастість затухання перехідного процесу – це відношення перерегуляції двох послідовних амплітуд одного знаку. Чисельником виступає амплітуда першого коливання. Цей параметр показує наскільки швидко зменшується затухання процесу.

- Логарифмічний декремент коливання – це натуральний логарифм за відношенням сусідніх перерегулювань. Обернена його величина вказує скільки коливань потрібно, щоб їх амплітуда змінилась в e разів.

- Час перехідного процесу – це час який треба для того щоб вихідний сигнал наблизився до заданого значення. Часто використовуються, так звані, «п'ятипроцентні коридори». При входженні сигналу в нижню або верхню межу такого коридору визначається час перехідного процесу.

- Коливальність – це схильність системи до коливань, ця характеристика визначається як відношення амплітуд другого коливання з першим взяті по модулю та помножене на 100%.

- Встановлена помилка – це різниця передбачуваного та реального значення вихідного сигналу в часі, що прямує до нескінченності. Помилка дорівнює нулю в ідеальних астатичних системах[25]

4.2 Отримання перехідної характеристики та передавальної функції

У грануляторі відбувається процес утворення гранул при висушуванні шарів та наростанню нових шарів, при цьому відбувається випаровування і передача тепла частинкам.

Так як основним каналом керування є $T1 \rightarrow T2$, то далі розглянемо перехідну характеристику залежності температури теплоносія та температури гранул (рис 4.4).

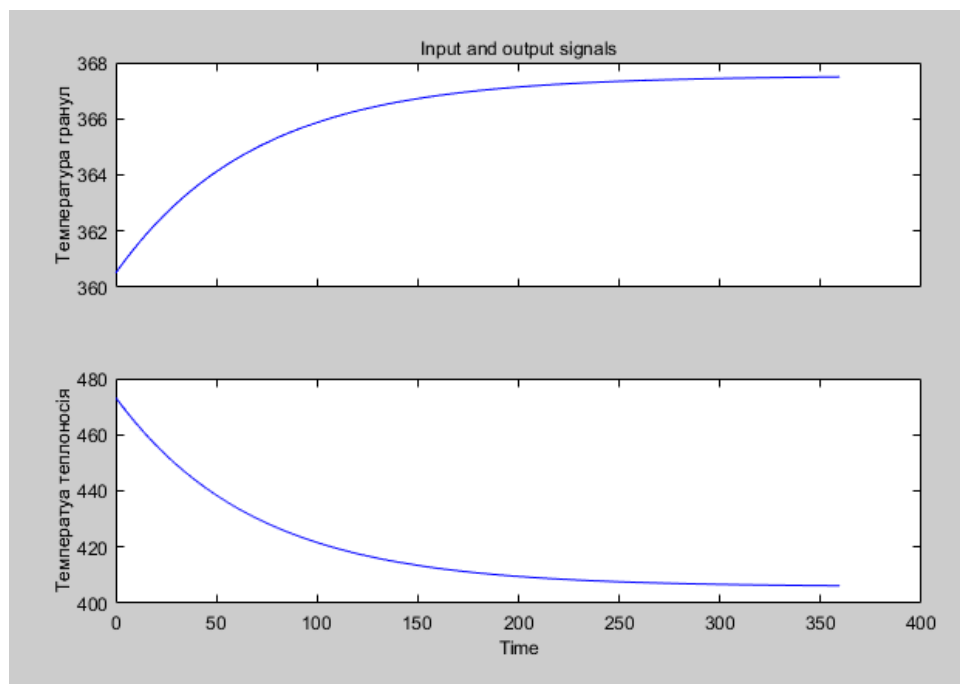


Рисунок 4.4 – Перехідна характеристика температури теплоносія та гранул

З використанням модулю MATLAB System Identification (рис. 4.5) було отримано передавальну функцію виду:

$$W(p) = \frac{4481s+66.4}{s^2+5916s+73.32} \quad (4.6)$$

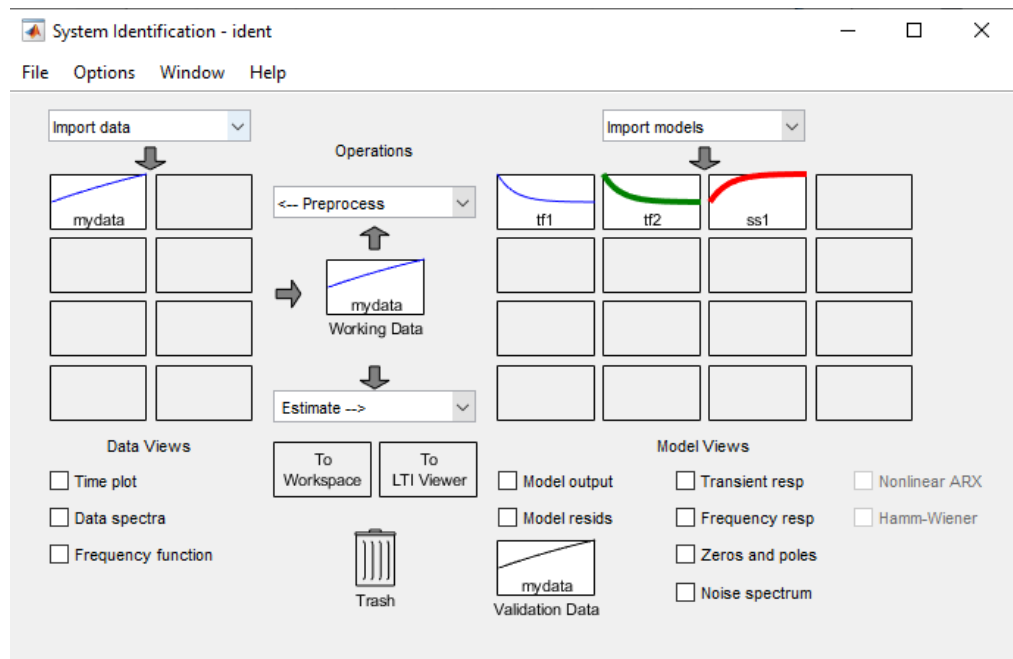


Рисунок 4.5 – Синтез передавальної функції у модулі System Identification

Перевіримо систему та отримаємо графік передавальної функції який показує реакцію системи на одиничний крок (рис 4.6)

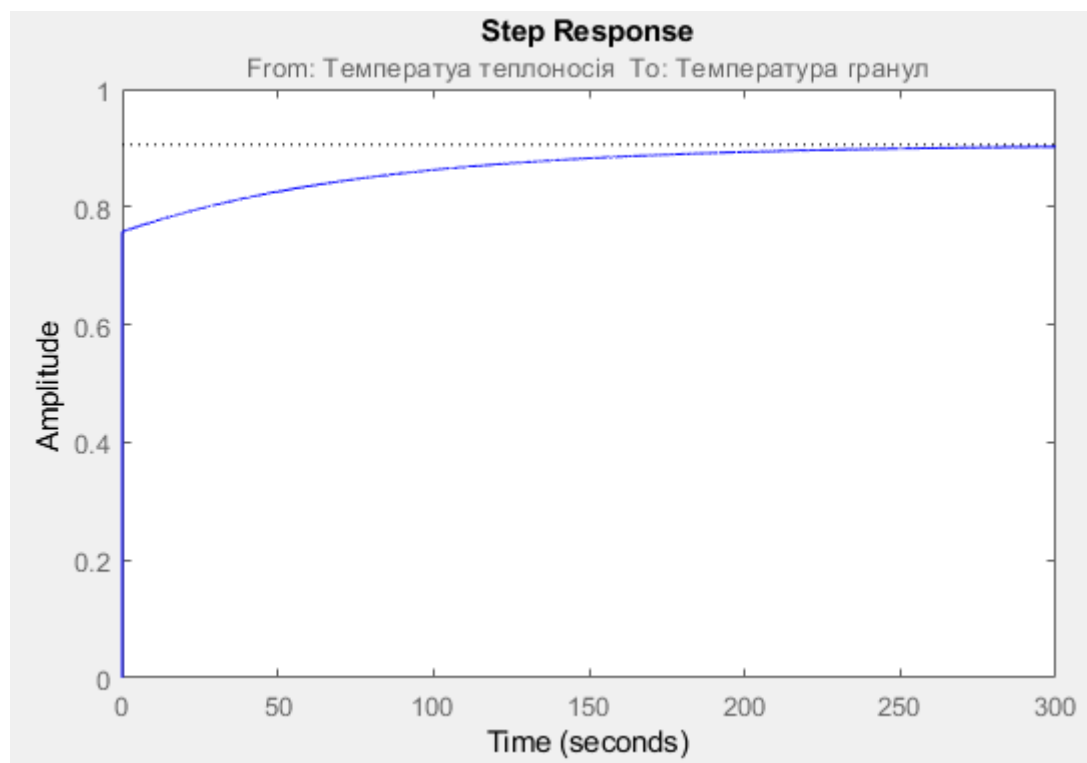


Рисунок 4.6 – Графік передавальної функції

4.3 Перевірка системи на керованість та спостережуваність

Керованість – це здатність системи при керуючому впливі переводитися з початкового стану (x_0) в кінцевий стан(x_k), за скінченний проміжок часу. Якщо система виконує ці умови повністю, то система називається повністю керованою. Якщо спостерігається відповідність тільки деяким станам, то система називається частково керованою, а якщо система не відповідає жодній з умов її називають повністю некерованою[26]. Для аналізу системи на керованість за допомогою пакету MATLAB треба проаналізувати матрицю:

$$P = [B \ AB \ A^2B \ A^{n-1}B] \quad (4.7)$$

У випадку якщо порядок системи рівний рагу матриці то, система вважається повністю керованою. Якщо ранг матриці менший за порядок системи, але більший за нуль, то система рахується частково керованою, а коли ранг матриці дорівнює нулю, то система повністю некерована.

Спостережуваність – властивість системи за вихідними величинами $x(t)$, при вказаних вхідних керуваннях, знайти координати станів системи за скінченний проміжок часу. Для визначення спостережуваності системи, треба знайти приведену нижче матрицю:

$$H = [C^T \ A^T C^T \ (A^T)^2 C^T \ \dots \ (A^T)^{n-1} C^T] \quad (4.8)$$

Для знаходження рангу системи береться найбільший порядок ненульового мінора в матриці. У випадку якщо порядок системи рівний рагу матриці то, система вважається повністю спостережувана. Якщо ранг матриці менший за порядок системи, але більший за нуль, то система рахується частково спостережуваною, а коли ранг матриці дорівнює нулю, то система повністю не спостережувана[27].

За допомогою функцій в MATLAB перевіримо чи є система спостережуваною та керованою:

$H = \text{obsv}(A, C)$ – Знаходимо матрицю спостережуваності системи;
 $\text{rank}(H)$ – Знаходимо ранг для матриці спостережуваності;
 $P = \text{ctrb}(A, B)$ – Знаходимо матрицю керованості системи;
 $\text{rank}(P)$ – Знаходимо ранг для матриці керованості.

Результати перевірки показали ранги матриць рівні 2, це означає що дана система є спостережуваною та керованою водночас.

4.4 Синтез лінійно квадратичного регулятора (LQR)

Сучасні потужні комп'ютери та програмні модулі, які підтримуються на цих комп'ютерах дозволяють інженеру моделювати системи керування та досліджувати їх. В такий спосіб можна оцінити систему, якість її керування та відразу бачити недоліки та доречність зроблених рішень. Для досягнення цієї мети були винайдені програмні пакети візуального моделювання.

MATLAB є одним з найкращих програмних продуктів у цій ніші. Він має потужні функціональні можливості та перевірений часом. Користувач може використовувати його при вирішенні задач у різних областях людської діяльності.

Лінійно-квадратичний регулятор(англ. Linear quadratic regulator) – один із типів регуляторів в теорії управління, який використовує квадратичний функціонал якості[28]. Динамічна система, яка описується лінійними диференціальними рівняннями, а показником якості є квадратичний функціонал є завданням лінійно-квадратичного управління.

Переваги лінійно квадратичного регулятора:

- Безінерційність;

Недоліки лінійно квадратичного регулятора:

- Велика кількість ітерацій;
- Необхідність зв'язку по всьому вектору стану;
- Треба вираховувати точну модель об'єкта.

Для безперервних систем описуваних в просторі станів маємо:

$$x' = Ax + Bu, \quad (4.9)$$

де A та B матриці моделі.

Критерій оптимальності:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + U^T R u) dt, \quad (4.10)$$

де для синтезу LQR регулятора потрібні матриці моделі A , B та матриці при критерію якості Q , R .

Де Q та R – це позитивно визначені матриці.

$x^T Q x$ – інтегральна квадратична похибка, яка відповідає за якість регулювання системи на інтервалі від нуля до нескінченності. Якість може задаватися відповідною матрицею Q .

$U^T R u$ – характеризує енергію яка буде затрачена для регуляції. Цей параметр задається одиничною матрицею R .

Знаходимо матриці A та B з отриманою передавальної функції у попередньому розділі при використанні команди: `sys = ss(Wp)`; пакета Control System Toolbox.

Де – `sys` - це модель, `Wp` – це передавальна функція об'єкту управління.

В результаті отримуємо такі матриці:

$$A = \begin{bmatrix} -5916 & -9.165 \\ 8 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 64 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.12)$$

$$C = [70.02 \quad 0.1297], \quad (4.13)$$

$$D = [0]. \quad (4.14)$$

Маємо рівняння:

$$\dot{x}' = \begin{bmatrix} -5916 & -9.165 \\ 8 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 64 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4.15)$$

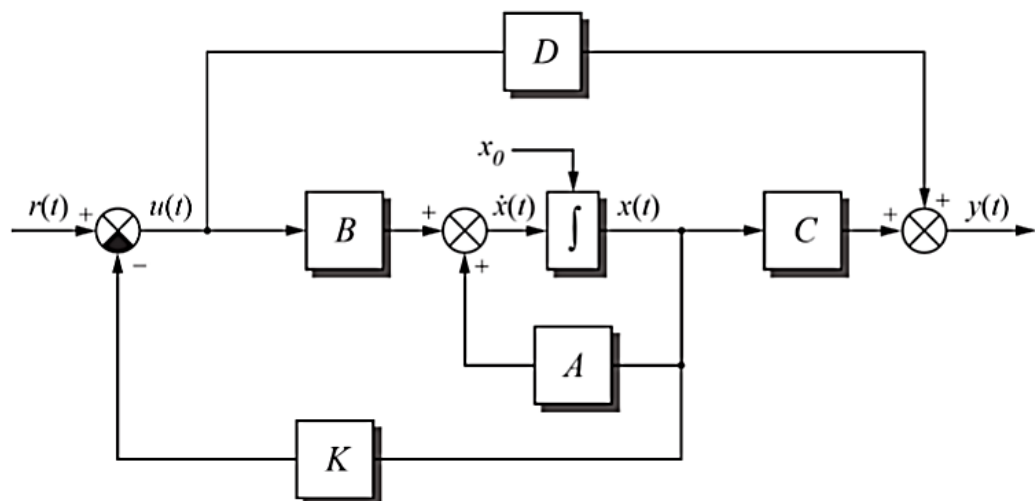
Керування, знайдене по LQR - алгоритму повинно задовольняти критерій:

$$u = -R^{-1}B^T P x \quad (4.16)$$

Матриця P знаходиться з рівняння Ріккаті:

$$AP + A^T P + PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (4.17)$$

Структурна схема замкнутої системи у якій використовується лінійно-квадратичний регулятор в колі зі зворотнім зв'язком зображена на рис. 4.7.



$r(t)$ - вхід системи;

$x(t)$ - змінна стану системи;

$y(t)$ - вихід системи;

$u(t)$ - закон управління;

A, B, C, D - матриці простору – станів системи;

K – матриця зворотного зв'язку.

Рисунок 4.7 – Структурна схема замкнутої системи з лінійно-квадратичним регулятором

Для отримання рішення була використана функція з пакету Control System Toolbox MATLAB – $\text{lqr}(A, B, Q, R)$ та отримані коефіцієнти K зворотної матриці зв'язку.

$$K = \text{lqr}(A, B, Q, R); \quad (4.18)$$

$$K = [0.0066 \quad 0.8670]; \quad (4.19)$$

Для отримання графіку регулятора структурна схема побудована в MATLAB Simulink (рис 4.8).

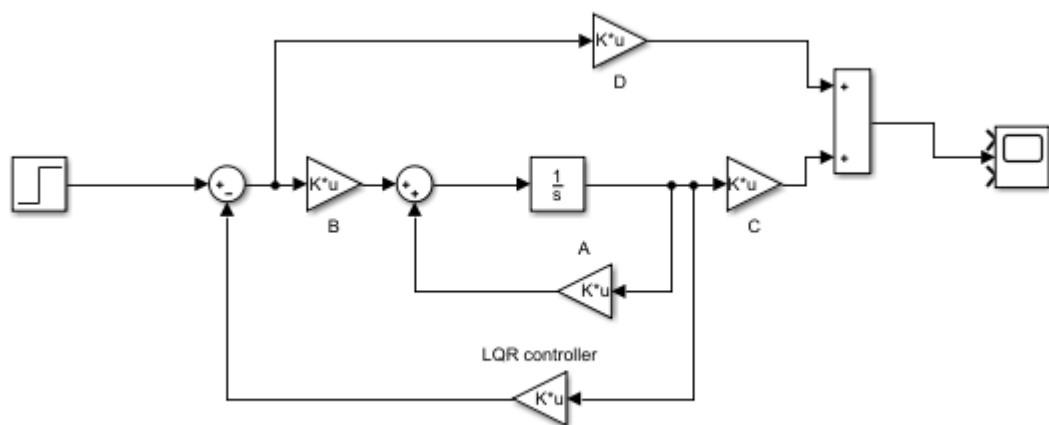


Рисунок 4.8 – Структурна схема замкнутої системи з лінійно-квадратичним регулятором

Графік перехідної характеристики з LQR регулятором: (рис 4.9)



Рисунок 4.9 – Графік перехідної характеристики з LQR регулятором

Як видно з графіка система стабільна, керована, виходить на задану температуру $T_2 = 364\text{K}$ та має час перехідного процесу $t_p = 18.7$ секунди, що прийнятно для регулятора такого типу. Перерегулювання відсутнє.

Для того щоб впевнитися, що розрахований регулятор побудовано правильно, та він надає швидке регулювання системи створимо реакцію системи на вихід температури 364K без регулятора, підібравши step належним чином

Створимо схему для перевірки ефективності регулятора в порівнянні з графіком передавальної функції (рис 4.10).

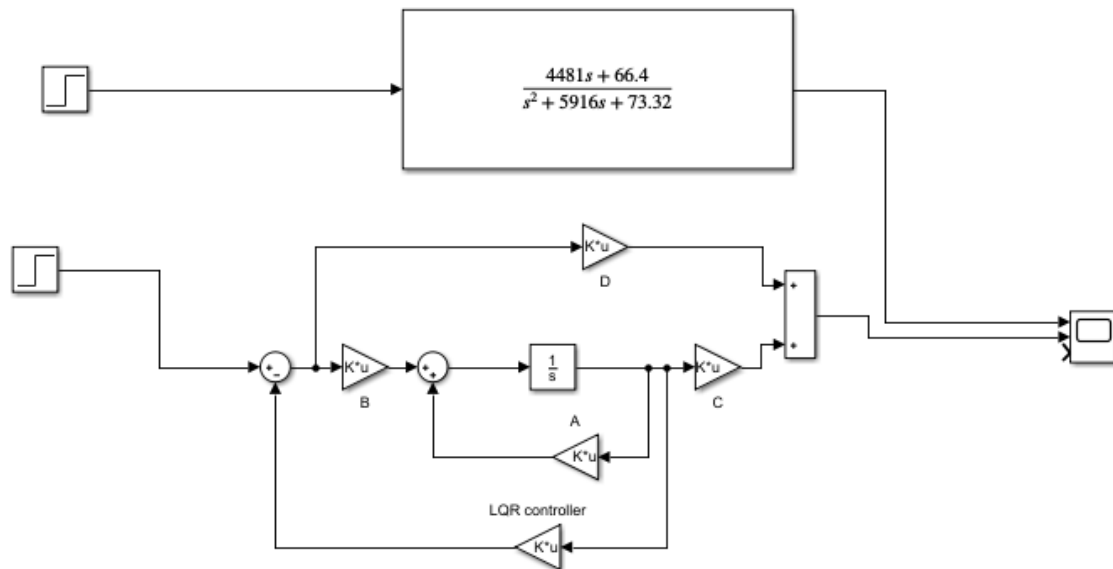


Рисунок 4.11 – Схему регулятора та передавальної функції

Як можна побачити з графіку регулятора температура починається з 0 К. Щоб змодельовати систему, яка найбільш наближена до реальних умов виберемо стартування з температури 300К що приблизно дорівнює кімнатній температурі. Для цього змінимо параметр інтегратора «Початкові умови».

Гранулятори часто забиваються при процесі грануляції тому середній час роботи не дуже великий. Час моделювання був вибраний 600 секунд, відповідно до режиму роботи грануляторів такого типу.

Накладемо отриманий графік з графіком передавальної функції (рис 4.12).

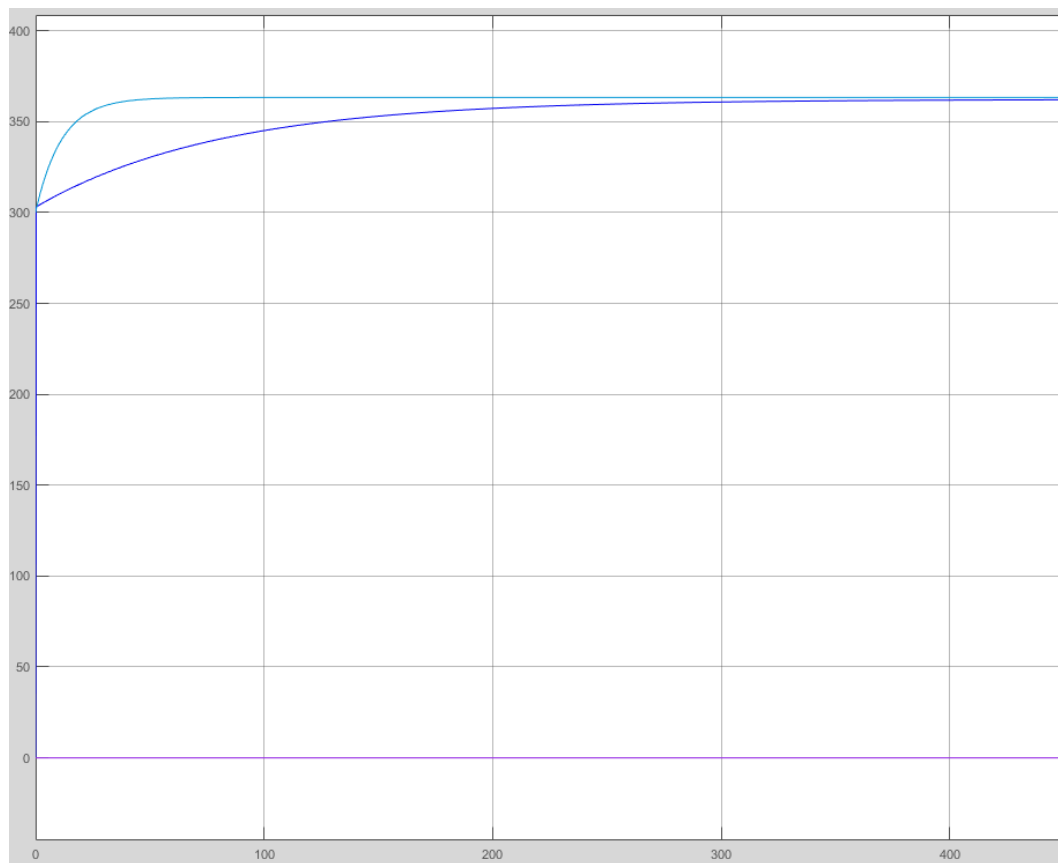


Рисунок 4.12 – Графіки передавальної функції та перехідної характеристики з LQR регулятором

Як видно з графіків, керована система виходить швидше на задану температуру при тому що час перехідного процесу системи $t_p = 143.564$ секунди в порівнянні з перехідною характеристикою з LQR регулятором $t_p = 18.7$ секунд та з нульовим перерегулюванням. Такий час перехідного процесу означає, що створений LQR регулятор заощаджує час на переведення системи до заданої температури, тобто заощаджує витрати на нагрівання гранул.

4.4 Порівняння LQR регулятора з PID регулятором

Створимо модель з PID регулятором в Simulink рис 4.13

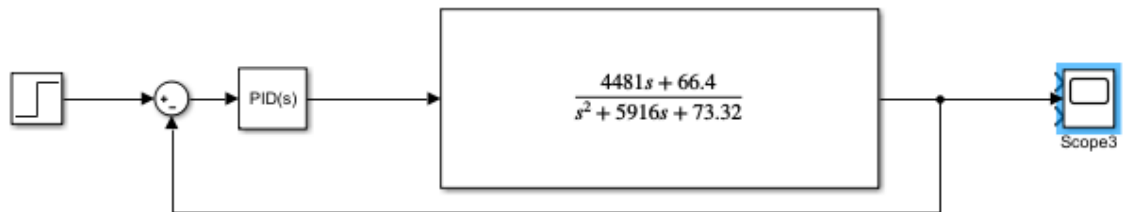


Рисунок 4.13 – Схема з PID у Simulink

Після налагодження параметрів у блоці Control System Design MATLAB (рис 4.14) отримуємо перехідний процес, який виводить температуру гранул на заданий рівень в 364К. Отримаємо графік системи з PID регулятором на рис 4.15

Схема PID регулятора та LQR регулятора в Simulink наведена на рис. 4.16.

| Main | PID Advanced | Data Types | State Attributes |
|-------------------------|--------------------------|--|------------------|
| Controller parameters | | | |
| Source: | internal | <input type="checkbox"/> Compensator formula | |
| Proportional (P): | 5 | | |
| Integral (I): | 0.2 | | |
| Derivative (D): | 0 | | |
| Filter coefficient (N): | 20 | | |
| Select Tuning Method: | Frequency Response Based | <button>Tune...</button> | |

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Рисунок 4.14 – Налаштування параметрів PID регулятора

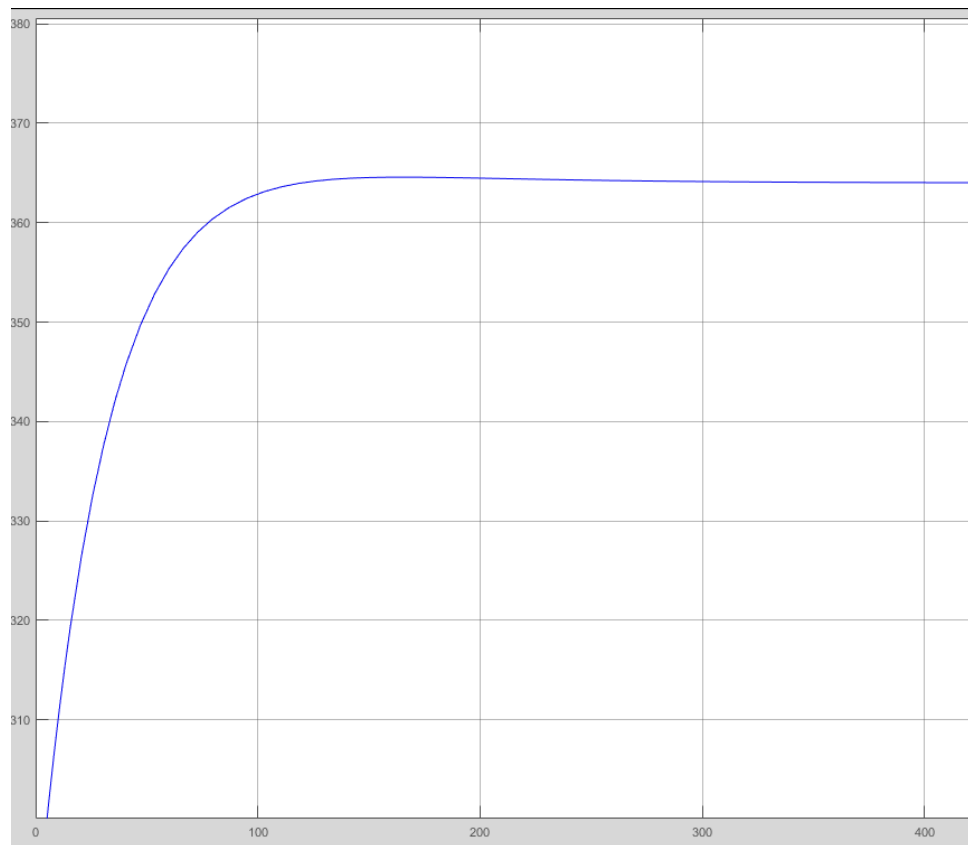


Рисунок 4.15 – графік системи з PID регулятором

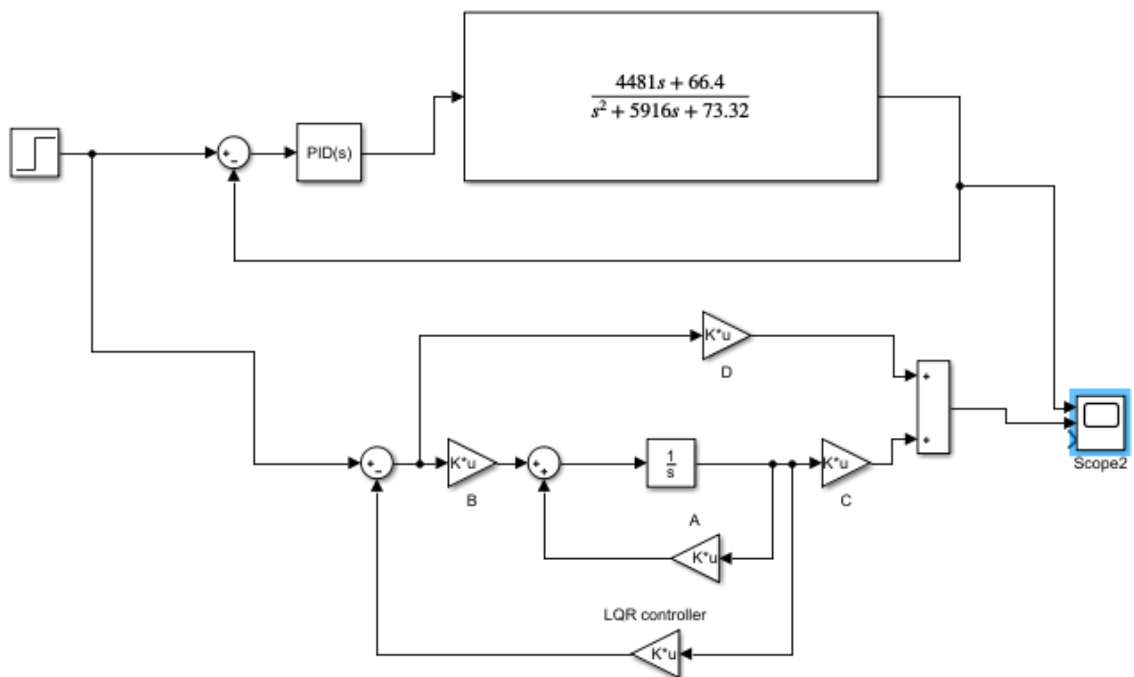


Рисунок 4.16 – Схема PID регулятора та LQR регулятора

Накладемо графіки регулювання системи з PID регулятором та LQR регулятором (рис 4.17)



Рисунок 4.16 – Графіки регулювання PID регулятора та LQR регулятора

Як видно з графіків, керована система з LQR виходить швидше на задану температуру при тому що час перехідного процесу системи $t_p = 18.7$ секунди в порівнянні з керуванням з PID регулятором $t_p = 57.5$ секунд та з нульовим перерегулюванням. Такий час перехідного процесу означає, що створений LQR регулятор заощаджує час на переведення системи до заданої температури, тобто заощаджує витрати на нагрівання гранул.

На основі регулятора була створена функціональна схема інформаційної системи управління у грануляторі з псевдозрідженим шаром наведена у додатку А.

Висновки до розділу

Грануляція з псевдозрідженим шаром - це складний процес взаємодії, на який впливає велика кількість факторів. Так як основним каналом керування є $T1 \rightarrow T2$, то було розглянуто перехідну характеристику залежності температури теплоносія та температури гранул.

З використанням пакету MATLAB System Identification було отримано передавальну функцію, а з неї здійснено перехід до векторно-матричної моделі.

Результати перевірки в MATLAB показали ранги матриць рівні 2, це означає що дана система є спостережуваною та керованою водночас.

Виділені основні фактори, які впливають на процес та створено LQR регулятор системи, який відповідає вимогам стабільності, динаміки та надійності. Отримано перехідний процес, який виводить температуру гранул на заданий рівень в 364К. Перехідний процес з LQR регулятором триває $t_p = 18.7$ секунд, що є реальним значенням для регуляторів такого типу.

В порівнянні з PID регулятором $t_p = 57.5$ секунд, система управління з LQR регулятором так само не має перерегулювання але, виходить на задане значення за короткий термін, що означає, що поставлена задача була виконана.

На основі LQR регулятора була створена функціональна схема інформаційної системи управління у грануляторі з псевдозрідженим шаром.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

5.1 Початок розробки, ідея, властивості, переваги

За останні десятиліття спостерігалось незначне зростання ринку, але після кризи, що відбулась в 2009 році почались значні зміни. Після них зросла ефективність ринку, покращилася його кадрова ситуація та сформувався надійний потенціал для прогресу на наступні роки. За прогнозами щорічний приріст продаж складатиме 4%. Відомо, що зростання попиту на САПР в регіонах залежить від його економічного стану. У країнах, де економіка знаходиться на високому рівні (наприклад США, Китай, Німеччина, Японія, Індія і т.д.), зростають обсяги виробництва і тим самим краще продаються системи та софт для автоматизації проектування.

Попит на обладнання, в тому числі системи автоматизації проектування зростає і має подальшу перспективу розвитку.

Серед основних споживачів на ринку промислової автоматизації виділяють енергетичну галузь, нафтовидобувну галузь, вугільну промисловість, хімічну, нафтохімічну, харчова промисловість, галузь будівництва.

На прикладі великих компаній, що існують на ринку можна зробити висновок що важливо мати змогу використовувати різні канали розподілу від прямого маркетингового каналу, що відбувається без посередників до складних схем, що включають оптових, роздрібних та функціональних посередників. На даний момент наша компанія розглядає найпростішу схему каналів розподілу, адже на початковій стадії виробництва і впровадження товару найважливішим є його технічне забезпечення та супровід, що не може реалізуватись посередниками.

На ринку промислової автоматизації існує значна конкуренція, але основними конкурентними перевагами інших підприємств є брендове ім'я та великі обсяги виробництва, а нашою – новаторство, принципово новий підхід, та «близькість» до споживача.

Цільова аудиторія: сільськогосподарські компанії, приватні фермерські господарства, державний сектор агрокомплексу, приватні підприємства з виробництва мінеральних добрив та інші.

Основні конкурентні переваги. При неповній адекватності будови моделі та об'єкта, при впливі на об'єкт випадкових факторів, при значній різниці в початкових значеннях параметрів моделі, що налаштовується від параметрів об'єкта існує велика кількість екстремумів, що налаштовуються. В цьому випадку працездатними залишаються саме пошукові системи розпізнавання з адаптивною моделлю.

У випадку з механізмом зневоднення та утворення гранул у псевдозріженому шарі даний підхід допоможе корегувати модель об'єкта керування і як наслідок, значно покращить якість готового продукту і зменшить відсоток браку.

Фінансування. Насамперед даний проект розрахований на підтримку з боку держави, адже виробництво мінеральних добрив напряму корелює з підвищенням сільськогосподарської продуктивності, яке зазначено у Стратегії сталого розвитку України до 2030-го року. Але, для зростання можливості старту даного проекту потрібно розглядати декілька варіантів отримання грошей, які в майбутньому можна змінювати чи комбінувати. Можливі шляхи отримання фінансування:

Отримання кредиту. Незважаючи на грамотно складений бізнес-план, наявність поручителя та майна під заставу, отримати кредит на стартап досить важко адже банк найчастіше надає перевагу співпраці з працюючим бізнесом. Насправді, шанс існує, але потрібно подавати заявки відразу в декілька банків.

Народне фінансування, краудфандінг. Механізм народного фінансування стартапів являє собою збір коштів на різних засадах: наприклад, пожертвування або краудінвестинг, коли ті інвестори, що вклали гроші, отримують фінансову винагороду. Також є спеціальні web-спільноти, завдяки яким забезпечується функціонування краудфандінга.

Приватні інвестори. Це інвестори, які вкладають свої індивідуальні кошти в основному в інноваційні проекти. Окрім грошей, вони також можуть інвестувати в проекти свій досвід, технології та зв'язки в обмін на їх частку в даному проекті.

Венчерне підприємство (англ. Venture company) - підприємство малого бізнесу, яке займається дослідно-конструкторськими розробками або іншими науковими роботами, завдяки яким здійснюються ризиковані проекти. Венчер буває зовнішнім та внутрішнім, що можна організувати своїми силами і венчерним підприємцем.

Зовнішній венчер займається збором коштів для здійснення ризикових проектів через пенсійні фонди, фінанси страхових компаній, кошти населення, накопичення держави та приватних інвесторів. На даний момент проект належить до фінансування через зовнішній венчер .

Асортимент товарів та послуг

Товар за задумом: покращення якості гранульованих мінеральних добрив; зменшення витрат на енергетику, матеріальні та людські ресурси у виробництві.

Товар у реальному виконанні: гранулятор у псевдозрідженому шарі, система його керуванням.

Товар з підкріпленням: ініціювання, обслуговування та супровід систем, навчання персоналу.

В часи коли суспільство переходить до більш інформаційного рівня складається сприятливе середовище для створення та розвитку інновацій на виробничому ринку, все це призводить до зростання попиту на нові засоби промислової автоматизації;

Запровадження нових ресурсо- та енергозберігаючих технологій, способів керування і гранулювання є невід'ємною частиною наукового прогресу та надзвичайно актуально для сьогодення. Замість багатостадійних процесів висушування в хімічній промисловості знайдено застосування технології гранулювання з псевдозрідженим шаром, що дозволяє поєднувати в одному апараті всі стадії процесу: випарювання розчину, кристалізацію та сушіння отриманого продукту з одночасним його гранулюванням.

Псевдозрідження - це спосіб взаємодії течії зріджуваного агенту (рідини або газу) з шаром твердого чи зернистого матеріалу, коли тверді частинки, суспендовані в течії набувають пульсаційного чи вихрового руху у межах даного шару.

Насичення гуматами дає йому більшої агрохімічної цінності, що дає змогу вирішити багато актуальних проблем.

Переваги використання гуматів в гранульованому азотно-сірковому добриві:

- прискорюється проростання насіння та покращується якість розсади
- покращується розвиток кореневої системи рослин завдяки чому збільшується всмоктування рослинами поживних речовин азотно-сіркового добрива удвічі, підвищується засвоєння рослинами мінеральних речовин та мікроелементів;
- підвищується стійкість рослин до зовнішніх несприятливих чинників (низької температури, недостатньої освітленості та зволоження) та внутрішніх несприятливих чинників(хвороб та шкідників)
- підвищується ріст ґрунтових мікроорганізмів, а це сприяє значному відновленню гумусу;
- покращується якість вирощеної продукції: збільшується вміст вітамінів, білків, крохмалю, нуклеїнових кислот і цукру в рослинах, підвищення клейковини в зерні на 3,5%;
- беруть участь у зв'язуванні продуктів техногенного забруднення: сполук свинцю, ртуті, пестицидів та радіонуклідів; перешкоджають їх проникненню з ґрунту в рослину і саме цим забезпечується екологічна чистота даної продукції.

Гранульоване азотно-сіркове добриво- високоефективне добриво, використання якого забезпечує істотну економічну та агрономічну ефективність вирощування базових сільськогосподарських культур.

Базовою сировиною, що використовується для виробництва добрива є:

- амоній сульфат;
- натрієва або калієва сіль гумінових кислот.

Відомо, що кожній культурі властива індивідуальна фізіологія мінерального обміну що особливо стосується сполук азоту та сірки. Тільки за умов дотримання фізіологічного балансу вирішується завдання забезпечення оптимального мінерального живлення. Тільки за такої умови культура здатна нормально синтезувати білки, а також підвищується коефіцієнт поглинання азотних сполук.

Найсуттєвіші переваги гранульованого азотно-сіркового добрива у порівнянні з кристалічним сульфатом амонію наведено нижче.

Покращені агро-хімічні переваги:

- гранули розсіюються однорідно за допомогою технічних засобів;
- грануляність добрива забезпечує можливість використання його в тукоsumішах оскільки воно не вступає в хімічну реакцію з іншими складовими тукоsumішей і забезпечує постійний хімічний і гранулометричний склад);
- не призводить до опіків на рослинах.
- насамперед азотно-сіркове добриво рекомендується для культур, що потребують наявності значного вмісту сірки (капуста, ріпак, гречка, пшениця), а також тим які надають перевагу амонійній формі азоту нітратного (кормові культури , картопля, цукровий буряк,);

Отже, рекомендовано вносити азотно-сіркове добриво при підживленні, а також як основне внесення перед посівною культивуацією, що забезпечить рівномірний розподіл добрива по полю.

Інтенсивний розвиток промислового виробництва багатьох країн потребує нових , технічно складних засобів автоматизації, які дозволять вирішувати серйозні системні задачі. Даний факт вказує на те, що зростатиме попит на все більш досконалі системи автоматичного управління;

Підвищення ціни на енергоносії, оплату найманим працівника призводить до значних витрат і потребує застосування автоматизації на максимальному рівні, тому що саме автоматизація дозволить створити режим справжньої економії.

Таблиця. 5.1 – Аналіз внутрішнього маркетингового середовища підприємства

| Внутрішні фактори | Дія фактору | Орієнтованість | Варіанти вирішення проблем |
|-------------------------------------|--|--|--|
| Проблема стратегічного планування | Важкість прогнозування, постановки цілей та завдань роботи компанії | | Провести комплексні маркетингові дослідження, розробити стратегію діяльності компанії враховуючи кризовий стан |
| Недостатньо коштів для фінансування | Фізичний знос устаткування здійснюється поступово | | Внести зміни до фінансового плану проекту; знайти нових інвесторів |
| Інноваційність технології | Втрата потенційних клієнтів, що надають перевагу традиційним методам виробництва | Цільова аудиторія-клієнти, орієнтовані на оновлене виробництво | Шукати клієнтів-новаторів Спробувати привабити консерваторів акцентуючи їх увагу на якості систем |

Таблиця. 5.2 – Узагальнююча таблиця результатів аналізу

| № п/п | Узагальнення результатів аналізу |
|----------|---|
| 1 | Комплексне маркетингове дослідження |
| 2 | Стратегія діяльності компанії враховуючи кризовий стан |
| 3 | Оптимізація управління трудовими ресурсами |
| 4 | Визначення методів, спрямованих на зростання продуктивності праці |
| 5 | Пошук нових інвесторів для фінансування |
| 6 | Орієнтованість на клієнтів-новаторів |
| 7 | Визначення шляхів та методів приваблювання клієнтів-консерваторів |
| 8 | Презентування компанії та просування товару різноманітними способами |

5.2 Аналіз зовнішнього маркетингового середовища

5.2.1 Аналіз факторів макромаркетингового середовища

Таблиця 5.3 – Підсумкова таблиця факторів політико-правового середовища

| Фактори | Дія фактору | | Варіанти вирішення проблем |
|--|--|---------|--|
| | Можливості | Загрози | |
| Регуляція діяльності підприємства законодавчими актами та законами | Підвищення якості товарів і послуг застосовуючи ліцензування та сертифікацію | | Дотримуватись прав захисту споживачів, забезпечити безпеку праці, годин роботи, мінімальної заробітної плати |

Продовження таблиці 5.3 – Підсумкова таблиця факторів політико-правового середовища

| | | | |
|--|---|---|--|
| Стратегія сталого розвитку України щодо сільськогосподарської продуктивності | Використання інвестицій держави для впровадження технологій | | Знайти канали зв'язку з державними установами для одержання інвестицій |
| Спрямованість України в Європейському напрямку | Зростання ринку збуту товару | Заміна вітчизняного товару на закордонний | Максимально наблизити товар до вимог Європейського середовища |

Таблиця 5.4 – Підсумкова таблиця факторів економічного середовища

| Фактори економічного середовища | Дія фактору | | Варіанти вирішення проблеми |
|---|-------------|--|--|
| | Можливості | Загрози | |
| Економічна криза | | Недостатність фінансування, відсутність інвесторів | Знайти шляхи здешевлення товару без втрати його якості |
| Зниження рівня промислового виробництва в регіоні | | Недостатність місць впровадження технології | Зосередитись на пошуках закордонних клієнтів |

Продовження таблиці 5.4 – Підсумкова таблиця факторів економічного середовища

| | | | |
|------------------------------|--|---|------------------------------------|
| Економічний потенціал країни | | Недостатня кількість підприємств, що здатні оновити систему | Вивести товар на закордонний ринок |
|------------------------------|--|---|------------------------------------|

Табл. 5.5 – Підсумкова таблиця факторів науково-технічного середовища

| Фактори | Вплив фактору | | Альтернативні шляхи вирішення проблеми |
|--|---|-------------------------|--|
| | Можливості | Загрози | |
| Інтенсивний розвиток НТП | Для того, щоб бути конкурентоспроможним, підприємству необхідно відповідати все більш зростаючим вимогам до технології та обладнання. | | Спостереження та впровадження технологій, що йдуть в ногу з часом |
| Поява нових інноваційних технологій керування та виробництва | | Поява нових конкурентів | Постійний розвиток та вдосконалення товару, орієнтація на постійних клієнтів |

Таблиця 5.6 – Підсумкова таблиця факторів соціокультурного середовища

| Фактори соціокультурного середовища | Дія фактору | | Варіанти вирішення проблеми |
|---|--|---|---|
| | Можливості | Загрози | |
| Консерватизм українського населення | | Надання переваги перевіреним технологіям замість новітніх | Показувати на практиці переваги якості інноваційного товару |
| Постійне бажання людини позбавитись зайвої роботи | Конкурентна перевага за рівнем автоматизації, зменшення кількості та тривалості людської праці | | Вдосконалити систему для зменшення рівня людської праці |

Таблиця 5.7 – Підсумкова таблиця факторів природного середовища

| Фактори природного середовища | Дія фактору | | Варіанти вирішення проблеми |
|---|--|---------|--|
| | Можливості | Загрози | |
| Безпека навколишнього середовища та енергоефективність технологій | Конкурентна перевага за рахунок, енергоефективності та екологічної безпеки | | Знайти шляхи доведення та презентації переваг товару компанії над іншими |

5.2.2 Фактори мікроркетингового середовища які будуть впливати на бізнес

Таблиця 5.8 – Підсумкова таблиця впливу споживачів

| Фактори | Вплив фактору | | Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості |
|--|---|--|--|
| | Можливості | Загрози | |
| Здібність споживачів торгуватися | | Втрата потенціальних клієнтів через велику вартість товару та послуг | Співробітництво з клієнтами на взаємовигідних угодах поступок |
| Вимога споживачів мати не тільки якісний, але й естетично вартий товар | Усунення конкурентів за рахунок унікального дизайну | Утрата клієнтів за невідповідністю зовнішнього вигляду товару | Стала робота над дизайном та ергономічністю продукту |
| Орієнтація покупців на певну торгівельну марку | | Утрата потенційно цінних клієнтів | Вдосконалення іміджу компанії, доведення слів ділом, підтвердження якості продукту |

Таблиця 5.9 – Підсумкова таблиця впливу конкурентів

| Фактори | Вплив фактору | | Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості |
|------------------------------------|---------------|--|---|
| | Можливості | Загрози | |
| Змагання між наявними конкурентами | | Витіснення суперниками компанії з ринку | Зіставлення, аналіз товару конкурентів, набуття гарних тенденцій та запобігання помилок конкурентів |
| З'явлення нових суперників | | Рівень інноваційності нових конкурентів переважає рівень інноваційності компанії | Дослідження ринку, спроби технологічно переганяти конкурентів |
| Поява товарів-замінників | | Появлення інноваційного промислового обладнання, що не потребує впровадження пропонуваніх систем | Праця над адаптивністю систем для запровадження на різні типи, види та рівні створення продукту |

Таблиця 5.10 – Підсумкова таблиця впливу постачальників

| Фактори | Вплив фактору | | Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості |
|---|--|---------------------------------|--|
| | Можливості | Загрози | |
| Здібність постачальників торгуватися | Домовленість на взаємовигідних угодах поступок | Утрата цінних постачальників | Дипломатичність у контактуванні з постачальниками, при необхідності просування компаній-постачальників |
| Скорочення кількості допустимих постачальників в умовах кризи | | Утрата постійних постачальників | Присутність відносин з різними постачальниками, що можуть бути взаємозамінні |

Таблиця 5.11 – Підсумкова таблиця впливу контактних аудиторій

| Фактори | Вплив фактору | | Альтернативні шляхи вирішення питання |
|---|---|--|--|
| | Можливості | Загрози | |
| Внутрішня контактна аудиторія виробництва | Підняття продуктивності розроблень за рахунок плідотворної командної роботи | Зниження продуктивності розробок за рахунок поганих відносин у колективі | Підняття командного духу, проведення змагань, корпоративів, пошук спільних інтересів |

Продовження таблиці 5.11 – Підсумкова таблиця впливу контактних аудиторій

| Засоби масової інформації | Просування особистого власного бренду | Просування суперників, публікація неправдивої інформації | Просування власного бренду за рахування взаємодії з усякими видами ЗМІ |
|--|---|--|---|
| Професійно-технічні конференції, спільноти | Добування фірмою «свого імені» у професійно-технічній спільноті | | Співпраця з цими спільнотами, ідвідування, тематичних заходів, використання будь-якого шансу заявити про себе |

5.3 Формулювання управлінської проблеми

Таблиця 5.12 – SWOT-аналіз

| Сильні сторони | Слабкі сторони |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Висока інтелектуальна здібність компанії - Інноваційність технології - Високий рівень енергозбереження та ресурсозбереження взагалі - Можливість виходу на зарубіжний ринок | <ul style="list-style-type: none"> - Незнайоме «ім'я» підприємства - Недостатній рівень фінансування - Велика конкуренція на ринку - Скорочення кількості імовірних постачальників в умовах кризи |
| Перспективи | Загрози |
| <ul style="list-style-type: none"> - Прерогатива над конкурентним товаром за рахунок | <ul style="list-style-type: none"> - Поява інноваційного промислового оснащення, що не |

Продовження таблиці 5.12 – SWOT-аналіз

| | |
|--|---|
| <p>малокомпонентності, енергоефективності, екологічної безпеки</p> <p>- Підняття продуктивності розроблень за рахунок ефективної командної роботи</p> <p>- Усунення конкуренції за рахунок особливого дизайну систем</p> <p>- Плідне співробітництво з постачальниками на взаємовигідних умовах поступок</p> | <p>потребує введення пропонованих систем</p> <p>- Витіснення суперниками компанії з ринку</p> <p>- Недостатньо фінансування, відсутність інвесторів</p> <p>- Дефіцит клієнтів підприємств, що можуть дозволити собі оновлення систем</p> <p>- Витіснення вітчизняного товару імпортом</p> |
|--|---|

5.4 Конкурентний аналіз

Таблиця 5.13 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| Особливості середовища | Ознаки | Вплив на діяльність підприємства |
|---|---|---|
| <p>1. Тип конкуренції: Монополізм</p> | <p>Товар кожної фірми є недосконалим замінником продукту, який реалізують інші фірми.</p> <p>Диференціація товарів створює можливість обмеженого впливу на ринкові ціни</p> | <p>Компанія повинна робити ставку на основні відмінності своєї продукції</p> <p>Немала кількість продавців виключає можливість змови, не дає особливо впливати на ринкові ціни.</p> |

Продовження таблиці 5.13 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| | | |
|--|--|--|
| <p>2. Рівень конкурентної боротьби:</p> <p>Національна - конкуренція між компаніями в межах країни</p> | <p>Зменшення компаній-конкурентів, за рахунок того, що іноземні компанії не конкурують з національними.</p> | <p>Першим кроком орієнтуватися та виходити на національний ринок, збирати зворотній зв'язок, проблеми та побажання. Обхвачувати у співпраці максимальну кількість національних клієнтів, спілкуватися з ними особисто.</p> <p>Паралельно піднімати імідж компанії.</p> |
| <p>3. За галузевою ознакою:</p> <p>Міжгалузева</p> | <p>Системи ідентифікації та керування можна споживати для різногалузових виробництв та процесів (хоч у бізнес процесах), тощо.</p> | <p>Створення порівняно удосконалених систем, що можуть бути адаптованими до різногалузових споживачів.</p> |
| <p>4. Конкуренція за видами товарів:</p> <p>товарно-видова</p> | <p>Під час прийняття рішення про купівлю САК клієнт буде відбирати кращу за властивостями, або за ступенем вдоволення певних подіб</p> | <p>Передбачення прийомів просування товару та вираження його переваг з урахуванням потреб та точок зору різних категорій клієнтів</p> |

Продовження таблиці 5.13 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| | | |
|---------------------------------|--|--|
| 5. За інтенсивністю: марочна | Для успішного результату, підвищення каналів збуту, кількості клієнтів та партнерів необхідно зарекомендувати себе, створити власне ім'я | Створення логотипу, нанесення його (або назви) на продукт. Рекламування в Інтернеті. Підняти рівень поінформованості про товар. Збільшення кількості ділових контактів. |
|---------------------------------|--|--|

Таблиця 5.14 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі | Потенційні конкуренти | Постачальники | Клієнти | Товари-замінники |
|------------------|--|---|---|---|---|
| | «КОТРИС» (К), «КСК Автоматизація» (КСК), «Техінсервіс» (Т), «Спецмонтаж сервіс» (С) | Основні перешкоди входження на ринок: ефект масштабу великих компаній, дефіцит інвестицій | Існує загроза інтегрування постачальників в бізнес (відома подібна практика закордоном) | Цінова чутливість покупців. Симпатію до відомих брендів. Негативне ставлення до інновацій, недостатність фінансування | Інші фірми виробляють аналогічну продукцію. Але на даний момент аналогів по показникам продуктивності немає |

Продовження Таблиця 5.14 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| | | | | | |
|----------|---|---|---|---|--|
| Висновок | Основна перевага – досвід, відоме ім'я. Але, за рахунок інновацій, тісного контакту з клієнтом можна заробити імідж та добути нових клієнтів. | Можливість входу на ринок існує. Потенційним і конкурентам і можуть стати подібні підприємства - новатори | Постачальник і загалом не диктують умови. На даний момент фігурує велика низка можливих постачальників. Наш продукт є доволі адаптивним для видозмінених компонентів. | Диктують умови на ринку: якщо співвідношення ціна/якість буде не співмірним, можуть відмовитися від товару, оскільки є великий вибір аналогів | Мінімальне обмеження через товари-замінники. |
| | | | | | |

Таблиця 5.15 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значливим) |
|-------|-------------------------------|--|
| 1. | Доступна ціна | За рахунок малокомпонентності системи – загальна вартість знижується |
| 2. | Інноваційність технології | Впровадження стратегії інтенсифікації перемішування не було вжито в цьому напрямку раніше |
| 3. | Енерго- та ресурсозбереження | Завдяки підняттю точності керування підвищується ефективність процесу. Це сприяє отримуванню більш якісного продукту з меншим витрачанням ресурсів |

Продовження таблиці 5.15 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| | | |
|----|---|--|
| 4. | Адаптованість продукту на суміжні ринки | Використання систем ідентифікації та правління такого виду можна адаптувати під різні галузі виробництва |
| 5. | Можливість виходу на зарубіжний ринок | Інноваційність технології дозволяє упроваджувати ці системи не тільки на території України |
| 6. | Малокомпонентність | Порівняно незначна кількість компонентів на відміну від систем відомих виробників. |

Таблиця 5.16 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін систем керування перемішуванням

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Бали 1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Гранулярик» | | | | | | |
|-------|---|-----------|---|------|---------|---------|----|---------|---------|
| | | | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1. | Доступна ціна | 18 | | | К, Т | КС К | С | | |
| 2. | Інноваційність технології | 20 | Т, С | К | КС К | | | | |
| 3. | Енерго- та ресурсозбереження | 15 | Т | К, С | КС К | | | | |
| 4. | Адаптованість товару на суміжні ринки | 15 | | | Т, С | | К | КС К | |
| 5. | Перспектива виходу на закордонний ринок | 10 | | | Т, С | | | К | КС К |
| 6. | Малокомпонентність | 17 | Т | С, К | | КС К | | | |

5.5 Стратегії ринкові стартап-проекту

Таблиця 5.17 Обрання цільових груп потенційних споживачів

| № п/п | Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів | Готовність клієнтів сприйняти продукт | Орієнтовна потреба в межах цільової групи (сегменту) | Інтенсивність конкуренції в сегменті | Простота входження у сегмент |
|--|--|---------------------------------------|--|--|--|
| 1. | Приватні сільськогосподарські компанії | 85% | 75% | Відносна конкуренція. Попит залежить від величини компанії та фінансового стану. | Контактування на пряму з представниками підприємства дає більшу імовірність здобути прихильність у клієнта |
| 2. | Державний сектор агрокомплексу | 60% | 45% | Достатня конкуренція, тому що більшість конкурентів працюють на державному рівні | Є певна складність, оскільки компанія ще не має власного імені та позитивної репутації |
| Обрано такі цільові групи: Для здобуття іміджу та репутації компанії починати треба з приватних сільськогосподарських компаній, а в дальшому розповсюджувати свою роботу і на державному рівні | | | | | |

Таблиця 5.18 – Визначення базової стратегії розвитку

| № п/ п | Обрана альтернатива розвитку проекту | Стратегія охопленн я ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи | Базова стратегія розвитку |
|--------------|---|---|--|--|
| 1. | Якнайбільше зниження ціни | Масовий маркетин г | Ідеальне для клієнта співвідношення ціна/якість | Стратегія лідерства по витрачаннях |
| 2. | Підписання довгострокових контрактів | Диферен ційовани й маркетин г | Супровід систем, їх технічне обслуговування, учення персоналу | Стратегія диференціації |

Таблиця 5.19 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| № п/ п | Чи є «першо прохідц ем»? | Чи буде компанія шукати нових споживачів, або вихоплювати наявних у конкурентів? | Чи буде компанія повторяти основні характеристики товару конкурента, і які? | Стратегія конкурентної поведінки |
|--------------|-----------------------------------|---|--|---|
| 1 . | Ні | Слід починати з клієнтів, не зациклених на відомому бренді, тих, хто готовий до ноу- хау, експериментувати | Загальним для нашого товару і конкурентного є тільки основна ідея, а структура, компоненти, їх співвідношення є унікальними | Стратегія заняття конкурентн ої ніші |

Таблиця 5.20 – Визначення стратегії позиціонування

| № п/ п | Вимоги до товару цільової аудиторії | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможн і позиції власного стартап- проекту | Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту |
|--------------|--|---------------------------------|--|---|
| 1. | | | | |

5.6 Продуктові (маркетингові) стратегії стартап-проекту

Таблиця 5.21 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| № п/п | Потреба | Вигода, яку пропонує товар | Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити |
|----------|---------|-------------------------------|--|
| 1. | | | <ul style="list-style-type: none"> - Високий інтелектуальний потенціал - Інноваційність технології - Високий рівень енергозбереження та ресурсозбереження взагалі - Адаптованість товару суміжні ринки - Підвищення продуктивності процесу та якості товару |

Таблиця 5.22 – Опис трьох рівнів моделі товару

| Обрана альтернатива розвитку проекту | Сутність та складові | | |
|--|---|----|----------------|
| І. Товар за замислом | покращення якості готового продукту – гранул, зокрема гранульованих мінеральних добрив; зменшення витрат енергетичних, матеріальних та людських ресурсів на його виготовлення. | | |
| | Властивості/характеристики | м2 | Вр/Тх /Тл/Е/Ор |
| | | | |
| | Якість: відповідає Європейським нормам та ДСТУ. Тестування проводиться перед встановленням, а також на місці. | | |

Продовження таблиці 5.22 – Опис трьох рівнів моделі товару

| | |
|---|---|
| | Пакування – Пакування із картону з особливими захисними матеріалами всередині для уникання деформацій чи ушкодження |
| | Марка: «Гранулярик» |
| | <p>До продажу:</p> <ul style="list-style-type: none"> - програми лояльності при підписанні довготривалого контракту; - різні види доставок; - демонстрації та моделювання діяльності |
| | <p>Після продажу:</p> <ul style="list-style-type: none"> - впровадження; - сервіс обслуговування; - супровід; - Повна гарантія повернення грошей і заміни товару. |
| За рахунок чого потенційний товар буде захищено від підробок: буде розроблено патент на винахід, на кожному приладі буде акцизна марка та фірмовий штамп. | |

Таблиця 5.23 – Визначення меж встановлення ціни

| № п / п | Рівень цін на товари-замінювачі | Рівень цін на аналогічні товари | Рівень достатків цільової групи споживачів | Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар чи послугу |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|--|
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|--|

Продовження таблиці 5.23 – Визначення граней встановлення ціни

| | | | | |
|----|----------------|-------|-----------------|---|
| 1. | 25-40 тис. грн | немає | 70-130 тис. грн | Верхня: 30 тис. грн Нижня: 23 тис. грн |
|----|----------------|-------|-----------------|---|

Таблиця 5.23 – Формування систематичності збуту

| № п/ п | Специфіка закупівельної дії цільових клієнтів | Функції збуту, які має втілювати постачальник товару | Глибина каналу збуту | Оптимальна система збуту |
|--------------|--|--|----------------------------|-----------------------------|
| 1. | | | | |

Таблиця 5.24 – Концепція маркетингових комунікацій

| № п/ п | Специфіка поведінки цільових клієнтів | Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти | Ключові позиції, обрані для позиціонуван ня | Завдання реklamного повідомленн я | Концепція реklamного звернення |
|--------------|--|--|---|--|--------------------------------------|
| 1. | | | | | |

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації розглянуто процес зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Грануляція розпиленням в псевдозрідженому шарі дозволяє отримувати сипучі грануляти із заданими властивостями безпосередньо з рідин.

Найважливіші властивості зв'язувальної речовини включають в'язкість, концентрацію та вміст. Як правило, швидкість росту, максимальний середній діаметр гранул та кінцева пористість збільшуються у міру збільшення концентрації зв'язувальної речовини. Зв'язувальна речовина з низькою в'язкістю сприяє грануляції та швидкості росту, що обумовлено високою ймовірністю в'язучих речовин стикатися поверхнями.

Зроблено огляд математичних моделей таких як Мая, Оркутта й Девідсона-Харрісона, Грейса та Моделі балансу популяції та методів їх розв'язання.

Створено таку модель гранулятора, яка є стабільною, керованою та точно описує процес грануляції. У науковій роботі виконано дослідження принципу роботи гранулятора псевдозрідженого шару. Розроблено програмний модуль на мові Python, який на базі методу розв'язання диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта для четвертого порядку, дає стабільну та керовану систему. Спад температури теплоносія від 480 К до 410 К, а підвищення температури гранул тільки з 360 до 370 (тільки на 10 градусів) характерний для такого апарату тим, що йдуть витрати тепла на нагрівання повітря у самому апараті та стінок апарату.

Робоча температура апарату 10-15 градусів, що відповідає технологічним вимогам при створенні гранулятора з псевдозрідженим шаром.

З використанням пакету MATLAB System Identification було отримано передавальну функцію, а з неї здійснено перехід до векторно-матричної моделі. Результати перевірки в MATLAB показали ранги матриць рівні 2, це означає що дана система є спостережуваною та керованою водночас.

Виділені основні фактори, які впливають на процес та створено систему управління з LQR регулятором, яка відповідає вимогам стабільності, динаміки та надійності. Отримано перехідний процес, який виводить температуру гранул на

заданий рівень в 364K. Перехідний процес з LQR регулятором триває $t_p = 18.7$ секунд, що є реальним значенням для регуляторів такого типу.

На основі отриманого LQR регулятора була створена функціональна схема інформаційної системи управління у грануляторі з псевдозрідженим шаром.

В порівнянні з системою управління з PID регулятором $t_p = 57.5$ секунд, система управління з LQR регулятором так само не має перерегулювання але, виходить на задане значення за коротший термін, що означає, що поставлена задача була виконана.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корнієнко Б.Я. Інформаційні технології оптимального управління виробництвом мінеральних добрив : монографія / Б.Я. Корнієнко. – К.: Вид-во Аграр Медіа Груп, 2014. – 288 с.
2. Корнієнко Б.Я. Двохфазна модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2012. – № 2(10). – С. 31–35.
3. Wurster, D.E., Preparation of compressed tablet granulations by the airsuspension technique. II. J Am Pharm Assoc Am Pharm Assoc, 1960. 49: p. 82-4.
4. Олійник В. В., Ладієва Л. Р. Система керування процесом зневоднення та гранулювання в апараті псевдозрідженого шару [Текст]/ ДЕСЯТА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ СТУДЕНТІВ КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ – 2016
5. Jones, D.M., Factors to consider in fluid-bed processing. Pharmaceutical Technology, 1985. 9(4): p. 50, 55-62.
6. Banks, M. and M.E. Aulton, Fluidized-bed granulation - A chronology. Drug Development and Industrial Pharmacy, 1991. 17(11): p. 1437-1463.
7. Aulton, M. and M. Banks, Factors affecting fluidized-bed granulation. Manufacturing Chemist and Aerosol News, 1978. 49(12): p. 50-56.
8. Корниенко Б.Я. Математическая модель процесса гранулирования в псевдоожиженном слое с использованием теории фрактальных множеств / В.В. Новиков, Б.Я. Корниенко, А.А. Сомлев // Научный журнал «Вісник Національного авіаційного університету». – К.: НАУ, 2008. – № 3. – С. 196 – 200.
9. Корнієнко Б.Я. Особливості моделювання процесів переносу у дисперсних системах / Б.Я. Корнієнко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 2(8). – С. 5–9.

10. Schaafsma, S.H., et al., Effects and control of humidity and particle mixing in fluidbed granulation. *AIChE Journal*, 1999. 45(6): p. 1202-1210.
11. Ehlers, H., et al., Granule size control and targeting in pulsed spray fluid bed granulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 2009. 377(1–2): p. 9-15.
12. Närvänen, T., et al., Controlling granule size by granulation liquid feed pulsing. *International Journal of Pharmaceutics*, 2008. 357(1–2): p. 132-138.
13. Scott, M.W., et al., Continuous production of tablet granulations in a fluidized bed.I. Theory and design considerations. *J Pharm Sci*, 1964. 53: p. 314-20.
14. Khoshtaghaza, M.H. and R.A. Chayjan, Effect of some physical properties on fluidisation stability of grain products. *Biosystems Engineering*, 2007. 98(2): p. 192-197.
15. Rambali, B., L. Baert, and D.L. Massart, Using experimental design to optimize the process parameters in fluidized bed granulation on a semi-full scale. *International Journal of Pharmaceutics*, 2001. 220(1–2): p. 149-160.
16. Корнієнко Б.Я. Система керування процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // *Хімічна промисловість України*. – 2011. – № 6. – С. 63–68.
17. Hemati, M., et al., Fluidized bed coating and granulation: influence of processrelated variables and physicochemical properties on the growth kinetics. *Powder Technology*, 2003. 130(1–3): p. 18-34.
18. Tan, H.S., A.D. Salman, and M.J. Hounslow, Kinetics of fluidised bed melt granulation I: The effect of process variables. *Chemical Engineering Science*, 2006. 61(5): p. 1585-1601.
19. Radichkov, R., et al., A numerical bifurcation analysis of continuous fluidized bed spray granulation with external product classification. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2006. 45(10): p. 826-837.
20. Landgrebe, J.D. and S.E. Pratsinis, Gas-phase manufacture of particulates: interplay of chemical reaction and aerosol coagulation in the free-molecular regime. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1989. 28(10): p. 1474-1481.
21. Randolph, A.D. and M.A. Larson, *Theory of particulate processes : analysis and techniques of continuous crystallization*. 1988, San Diego: Academic Press.

22. Корнієнко Б.Я. Динаміка процесів зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі / Б.Я. Корнієнко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2012. – № 1(9). – С. 15–19.

23. Ramkrishna, D., Population Balances. Theory and applications to particulate systems in engineering. . 2000, New York: Academic Press.

24. Syamlal, M. and T.J. O'Brien, Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed. American Institute of Chemical Engineers Symposium Series, 1989. 85: p. 22-31.

25. Arastoopour, H., P. Pakdel, and M. Adewumi, Hydrodynamic analysis of dilute gassolids flow in a vertical pipe. Powder Technology, 1990. 62(2): p. 163-170.

26. Di Felice, R., The voidage function for fluid-particle interaction systems. International Journal of Multiphase Flow, 1994. 20(1): p. 153-159.

27. Koch, D.L. and R.J. Hill, Inertial Effects in Suspension and Porous-Media Flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001. 33(1): p. 619-647.

28. Zhang, Y. and J.M. Reese, The Drag Force in Two Fluid Models of Gas-Solid Flows. Chemical Engineering Science, 2003. 58(8): p. 1641-1644.

ДОДАТОК А

ДОДАТОК Б

ДОДАТОК В

ДОДАТОК Г

ДОДАТОК Д

ДОДАТОК Е

ДОДАТОК Ж

ДОДАТОК И